

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE ÓPTICA Y OPTOMETRÍA
Departamento de Óptica



TESIS DOCTORAL

**Estudio y optimización espectral de la radiación visible para
la conservación del patrimonio cultural**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Santiago Jesús Mayorga Pinilla

Directores

Daniel Vázquez Moliní
Antonio Álvarez Fernández-Balbuena

Madrid, 2018

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE
MADRID

FACULTAD DE ÓPTICA Y OPTOMETRÍA

DEPARTAMENTO DE ÓPTICA



TESIS DOCTORAL

Estudio y optimización espectral de la
radiación visible para la conservación del
patrimonio cultural

Santiago Jesús Mayorga Pinilla

Madrid 2017

Estudio y optimización espectral de la
radiación visible para la conservación del
patrimonio cultural



MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

Realizada por:

D. Santiago Jesús Mayorga Pinilla

Dirigida por:

Dr. D. Daniel Vázquez Moliní

Dr. D. Antonio Álvarez Fernández-Balbuena

Madrid 2017

D. Daniel Vázquez Moliní, Profesor Titular del Departamento de Óptica de la Facultad de Óptica y Optometría en la Universidad Complutense de Madrid, y D. Antonio Álvarez Fernández-Balbuena Profesor en el Departamento de Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes en la Universidad Politécnica de Madrid

AUTORIZAN:

La presentación de la Tesis Doctoral titulada “Estudio y optimización espectral de la radiación visible para la conservación del patrimonio cultural”, realizada por D. Santiago Jesús Mayorga Pinilla, bajo su inmediata dirección y supervisión, para la evaluación y la obtención del grado de Doctor por la Universidad Complutense de Madrid.

Y para que conste donde fuera necesario, expido y firmo el presente certificado en Madrid a 30 de enero de dos mil diecisiete.

Fdo. D. Daniel Vázquez Moliní

Fdo. D. Antonio Álvarez Fernández-Balbuena

A todos los que habéis creído en mí

Agradecimientos

A Daniel Vázquez Moliní, él ha sido el responsable de que yo haya llegado hasta aquí. Su constante evaluación positiva, me ha permitido elaborar esta tesis, y me ha proporcionado todas las herramientas y facilidades para poder empezar y terminar el trabajo, gracias profesor.

A Antonio Álvarez Fernández-Balbuena, sus aportaciones han sido siempre enriquecedoras, dando puntos de vista que, sin duda, han ayudado a mejorar esta memoria, y en definitiva han contribuido a ampliar mis conocimientos sobre el tema expuesto.

A Maite, ha sido un placer compartir con ella estos años de formación. El reencuentro con la Universidad ha sido más sencillo gracias a su apoyo y guía. Su inteligencia y afán de ayudar a su entorno hacen, a los que hemos tenido la suerte de estar bajo su paraguas, que nuestros resultados hayan sido

mejores, mucha responsabilidad del desarrollo de esta tesis es suyo.

A mi familia, gracias por haber estado conmigo.

Por extensión, a todos los que habéis estado ayudándome mucho a mejorar todo lo realizado, este trabajo es vuestro también.

Agradecer al Instituto de Patrimonio Cultural de España las facilidades y el acceso a la información que ha posibilitado el desarrollo y la ejecución de esta investigación.

***Al hombre se le puede arrebatarse todo
salvo una cosa: la última de las
libertades humanas -la elección de la
actitud personal ante un conjunto de
circunstancias- para decidir su propio
camino.***

Viktor E. Frankl

Abreviaturas

Abreviaturas	
$\phi_r(\lambda)$	Flujo radiante efectivo
$\phi_l(\lambda)$	Flujo luminoso efectivo
ΔE_{ab}^*	Diferencia de color
A	Absorbancia de los materiales
$AEMET$	Agencia Estatal de Meteorología
$ARAAFU$	Association des Restaurateurs d'Art et d'Archaeologie de Formation Universitaire
b	Constante dependiente de la sensibilidad del material
$b(\lambda)$	Constante dependiente de la sensibilidad del material y de la longitud de onda
c	Velocidad constante de la luz en el vacío
C_0	Concentración inicial del colorante
c_a	Concentración de la especie absorbente
CAD	Diseño Asistido por Ordenador
CIE	Comisión Internacional de Iluminación
CIE_{Lab}	Espacio de color de la CIE
C_z	Número de celda correspondiente a cada muestra
$C.P.$	Conservación Preventiva
$D(\lambda)$	Daño en función de la longitud de onda
$D.I.$	Índice de daño
DA	Día claro/ despejado
DB	Día cubierto
DC	Día nublado
$E_D(\lambda)$	Irradiancia directa solar
E_{dm}	Irradiancia efectiva
E_e	Irradiancia
$E_{e\lambda}$	Irradiancia espectral
E_f	Energía del Fotón
$E_{il,rel}(\lambda)$	Irradiancia espectral luminosa relativa
$E_{iluminante}$	Irradiancia iluminante
$E_r(\lambda)$	Irradiancia difusa solar

$E_{rel}(\lambda)$	Irradiancia espectral solar normalizada
<i>et al.</i>	Y colaboradores
eV	Electrón Voltio
F'_{tot}	Iluminancia luminosa relativa
$F_{dm,rel}$	Flujo luminoso que produce un daño relativo
F_{tot}	Iluminancias modelo fotométrico
<i>Fig.</i>	Figura
$F_{v,rel}$	Flujo luminoso relativo
<i>GRF</i>	Factor de Riesgo Global
GRF_A	Factor de Riesgo Global con respecto a un iluminante A
<i>h</i>	Hora
<i>H</i>	Integración de la Irradiancia con el tiempo
\hbar	Constante de Planck
H_{dm}	Exposición radiante efectiva
$H_{dm}(\lambda, t)$	Exposición radiante efectiva espectral
H_{dm_abs}	Exposición radiante efectiva en función de la absorbancia
H_{dmA}	Exposición radiante efectiva correspondiente a un iluminante A
<i>HIL</i>	Nivel alto de irradiancia
<i>HR</i>	Humedad Relativa
$H_{s,dm}$	Umbral de la Exposición radiante efectiva
<i>ICC</i>	Instituto Canadiense de Conservación
<i>ICOM</i>	Consejo Internacional de Museos
<i>IESNA</i>	Illuminating Engineering Society of North America
I_o	Intensidad de la luz
<i>IR</i>	Radiación Infrarroja
<i>ISO</i>	International Organization for Standardization
I_t	Intensidad de luz transmitida
<i>J</i>	Julio
<i>k</i>	Constante entre flujo radiante y flujo luminoso
k_1, k_2	Constantes modelo de daño relativo
k_c	Constante de velocidad de reacción de 1º orden cinético
$k_{il,tot}$	Factor de escala modelo fotométrico
<i>l</i>	Longitud en metros

<i>led</i>	Diodo Emisor de Luz
<i>LIL</i>	Nivel bajo de irradiancia
<i>ln</i>	Logaritmo neperiano
<i>log10</i>	Logaritmo decimal
<i>lx</i>	Lux
<i>m</i>	Metro
<i>N_A</i>	Número de Avogadro
<i>n_f</i>	Número de fotones
<i>nm</i>	Nanómetros
<i>°C</i>	Grados Centígrados
<i>°K</i>	Grados Kelvin
<i>r.c.</i>	Rendimiento Cuántico
<i>PC</i>	Patrimonio Cultural
<i>PNCP</i>	Plan Nacional de Conservación Preventiva
<i>Rd</i>	Daño relativo
<i>Rd(λ)</i>	Daño relativo espectral
<i>Rd_{iluminante}</i>	Daño relativo del iluminante
<i>s</i>	Segundo
<i>s(λ)</i>	Responsividad espectral del material
<i>s(λ)_{dm,rel}</i>	Responsividad espectral relativa
<i>SATEL</i>	Satélite SATEL de la NASA
<i>SI</i>	Sistema internacional
<i>sz</i>	Sesión de envejecimiento de las muestras
<i>t</i>	Tiempo en horas
<i>T</i>	Transmitancia
<i>T(λ)</i>	Transmitancia espectral
<i>UNESCO</i>	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
<i>UV</i>	Radiación Ultravioleta
<i>V(λ)</i>	Eficiencia luminosa espectral para la visión fotópica
<i>VDR</i>	Valor de Daño Relativo
<i>VR</i>	Radiación Visible
<i>W</i>	Vatio
<i>X</i>	Logaritmo natural de <i>H_{dm}</i>

$\Delta\rho(\lambda)$	Diferencia entre Reflectancias espectrales
ν	Frecuencia en Hertzios
ϵ	Coeficiente de extinción molar de los materiales
λ	Longitud de Onda
μm	Micrómetros
$\rho(\lambda)$	Reflectancia espectral
$\alpha(\lambda)$	Absorbancia espectral

Índice

Abreviaturas.....	1-2
Índice	6
Resumen	11
Abstract.....	14
Organización general de la tesis.....	1-18
1. Introducción.....	23
1.1. Patrimonio cultural. Definición	26
1.2. La Conservación del patrimonio cultural.....	29
1.3. Antecedentes	31
1.4. Motivación.....	34
1.4.1. Aspectos culturales	35
1.4.2. Aspectos económicos.....	36
1.5. Agentes que deterioran el patrimonio cultural.....	38
1.6. La radiación visible	39
1.6.1. Definición	39
1.6.2. Características espectrales de la radiación visible	41
1.7. El color. Colorimetría	42
1.7.1. Sistema visual humano	45

1.7.2.	El observador estándar. CIE 1931.....	52
1.7.3.	Índice de reproducción cromática (IRC)	57
1.8.	Sistemas de iluminación en los museos	59
1.8.1.	Fuentes luminosas utilizadas en patrimonio cultural	65
2.	Objetivos Generales.....	71
3.	Análisis del deterioro que produce el efecto fotoquímico. Modelo de Daño.....	75
3.1.	Preliminares.....	79
3.2.	Interacción Luz-Materia	81
3.2.1.	La interacción de la luz con los materiales.....	81
3.3.	El efecto fotoquímico	84
3.3.1.	Leyes básicas que describen el efecto fotoquímico.....	85
3.3.2.	Rendimiento cuántico	87
3.3.3.	Procesos químicos entre el fotón y los materiales	87
3.4.	Nivel de irradiancia. Tiempo de exposición	90
3.4.1.	Niveles de Irradiancia y Tiempo de Exposición: su relación con la conservación preventiva.....	92
3.5.	Respuesta espectral del material utilizado en obras del patrimonio cultural	101
3.6.	Medida del Daño según la norma CIE 157-2004	109
3.7.	Escala Blue Wool	109
3.8.	El sistema CIELAB	111
3.9.	Cálculo del Umbral de la exposición radiante efectiva (Modelo Berlín)	113

3.10.	Respuesta de los colorantes a la luz	116
3.11.	Comportamiento térmico de los materiales	118
3.12.	Envejecimiento espectral de pinturas al óleo, acrílicas y gouaches en laboratorio	118
3.13.	Configuración Experimental.....	121
3.13.1.	Materiales y métodos	121
3.13.2.	Procedimiento experimental.....	122
3.13.3.	Medidas de la reflectancia espectral de las muestras	126
3.13.4.	Configuración Experimental. Daño Relativo	133
3.14.	Resultados y Discusión	134
3.14.1.	Valores del daño relativo R_d para cada muestra	135
3.14.2.	Modelo propuesto, análisis daño Relativo R_d	138
3.14.3.	Modelo Propuesto. Daño espectral.....	140
3.14.4.	Dependencia del parámetro b con el tiempo	143
3.14.5.	Aplicación del daño relativo R_d en iluminación	146
3.14.6.	Consideraciones futuras.....	150
4.	La Iluminación Natural aplicada en el patrimonio cultural	154
4.1.	Preliminares.....	158
4.1.1.	La luz natural en el patrimonio cultural.....	161
4.1.2.	Ventajas del uso de la luz natural	161
4.1.3.	Consideraciones para iluminar espacios interiores expositivos con luz natural	163
4.1.4.	Control del daño que produce la luz natural	165
4.1.5.	Acondicionamiento previo del espacio expositivo	167
4.2.	Aplicación de la Iluminación Natural en patrimonio cultural en el claustro del Monasterio de El Paular	173

4.2.1.	Modelo Geométrico-Fotométrico	175
4.2.2.	Modelo espectral de Iluminación Natural.....	179
4.2.3.	Modelo de Daño espectral	181
4.2.4.	Modelo Meteorológico	185
4.3.	Resultados.....	185
4.3.1.	Iluminancias obtenidas en el Modelo Geométrico-Fotométrico 185	
4.3.2.	Correspondencia entre los valores medidos y los calculados en el modelo Geométrico-Fotométrico	187
4.3.3.	Modelo espectral	187
4.3.4.	Modelo de Daño efectivo en las paredes verticales.....	189
4.3.5.	Evaluación espacio temporal del Daño efectivo.....	190
4.3.6.	Modelo Meteorológico	191
4.4.	Factor de Riesgo Global (<i>GRFA</i>).....	192
4.5.	Discusión	193
5.	Conclusiones.....	199
	Bibliografía	203
	Anexos	229
	Publicaciones indexadas	229
	Contribuciones a congresos	230
	Tablas anexas	232
	Anexo A.1.....	232

Resumen

Desde las instituciones dedicadas a la conservación del patrimonio cultural se conoce que la radiación visible, debido al efecto fotoquímico, es un agente que deteriora los objetos expuestos a ella; objetos que, por otra parte, es necesario exhibir y por tanto iluminar, algo que hace patente una dicotomía contrapuesta, la exhibición y la conservación. Por este motivo, es necesario desarrollar procesos que identifiquen el comportamiento de determinados materiales utilizados en las obras de arte del patrimonio cultural, según las características espectrales y la intensidad de la radiación visible usada. El objetivo principal de esta tesis es generar modelos que proporcionen esta información y que, a su vez, sirvan para obtener mecanismos de protección ante el deterioro que se produce debido al efecto fotoquímico en los materiales del patrimonio cultural.

La radiación visible provoca diferentes alteraciones en los materiales del patrimonio cultural. En esta tesis se han desarrollado dos metodologías que ayudan a conocer este tipo de alteraciones y cómo minimizarlas. En la primera metodología, se han diferenciado las fuentes luminosas, tanto en las características espectrales como en la intensidad, y con ellas se ha provocado un envejecimiento forzado en materiales usados habitualmente en obras del patrimonio cultural, como son las pinturas al óleo, gouache y acrílicas de diferentes colores. En la segunda

metodología, el estudio del comportamiento de los materiales y de la radiación se ha realizado sobre una exposición real de óleos en el claustro del Monasterio de Santa María de El Pualar iluminada con *luz natural*. Los dos métodos empleados han servido para identificar el progreso del daño producido en los materiales; además, el segundo ha servido para obtener el perfil de radiación espectral de la *luz natural* sobre cada cuadro de la exposición.

Los resultados obtenidos valoran el comportamiento de estos materiales, ante diferentes perfiles espectrales de la radiación visible; por una parte, cuando se utiliza iluminación artificial (desarrollado en el *Capítulo 3*), y por otra, esta información se ha hecho extensible para la *luz natural* y su uso en edificios iluminados con este tipo de radiación, que es el caso estudiado en la exposición real, (desarrollado en el *Capítulo 4*). Los datos obtenidos en ambos estudios han facilitado el diseño de estrategias para disminuir el efecto fotoquímico. El envejecimiento provocado en los materiales del primer estudio ha señalado que las pinturas gouache utilizadas en el estudio tienen una mayor resistencia a la radiación visible que el acrílico y que la mayor sensibilidad a esta radiación la posee el óleo. Además, se ha constatado que las radiaciones con una longitud de onda más corta producen un mayor daño sobre las pinturas utilizadas en el estudio. Este daño espectral diferencial cambia con el tiempo y cuando la pintura está más envejecida el comportamiento diferencial es menor. En el segundo estudio los resultados permiten

obtener mapas espacio-temporales de las paredes del claustro donde se exponen los óleos, que determinan los lugares idóneos de ubicación de los mismos, para el aprovechamiento de la *luz natural* como fuente de iluminación.

En conclusión, el efecto fotoquímico persiste en los objetos radiados, por lo que hay que desarrollar mecanismos de protección. En esta tesis, por una parte, se ha observado el comportamiento de los materiales, lo que permite estudiarlos para hacerlos más resistentes a este tipo de radiación, y por otra se ha comprobado que es posible generar, y así se proponen, sistemas que minimizan el daño que produce. También se ha desarrollado una metodología para evaluar con precisión el daño fotoquímico generado por la luz del día en el tiempo y en el espacio que posibilita la optimización de las políticas de exposición en edificios históricos.

Abstract

Institutions that are focused on exhibition and conservation of cultural heritage know since a very long time that visible radiation is a very important factor of damage for art goods due to the photochemical effect. But, in order to be exposed, art objects have to be necessarily illuminated and an unavoidable damage effect also appears. This dichotomy between exhibition and preservation is a very complex problem since it depends on multivariable factors. For this reason, it is necessary to develop processes that identify the behaviour of certain materials used in the art works, according to the spectral characteristics and the intensity of the visible radiation used. The main objective of this thesis is to generate models that provide this information, and which, in turn, serve to obtain mechanisms of protection against the deterioration that occurs due to the photochemical effect on cultural heritage materials.

Visible radiation causes different alterations in cultural heritage materials. In this thesis two methodologies have been developed that help to know this type of alterations and how to minimize them. In the first methodology, light sources have been differentiated, both in the spectral characteristics and in the intensity, and with them an accelerated aging has been caused in the materials commonly used in works of the cultural heritage, such as oil, gouache and acrylic pigments. In the second methodology, a study of the behaviour of materials and radiation has

been carried out on a real exhibition of oils in the cloister of the Monastery of Santa María de El Poular that is illuminated with *natural light*. The two methods used have been applied to evaluate the damage produced in the materials, and the second has also served to obtain the spectral radiation profile of the *natural light* on each area of the exhibition.

The obtained results let the restorer the understanding of the behaviour of these materials, when spectral distribution of light source changes; on the one hand, when artificial light is used (*Chapter 3*) and, on the other hand, this spectral damage function has been applied to museums with daylight systems due to historical or artistic reasons (*Chapter 4*). The data obtained in both studies have made possible the design of strategies to decrease the photochemical effect. The aging caused in the materials of the first study has pointed out that gouache paints used in the study have a higher resistance to visible radiation than acrylic, and that the oil has the highest sensitivity to visible radiation. In addition, it has been found that radiation with shorter wavelengths produces larger damage on the paints used in the study. This differential spectral damage changes with time and when paint is older the differential behaviour is lower. In the second study the results allow to obtain space time maps of the cloister walls where oils are exposed, which determine the ideal locations for the paints, when *natural light* is used as a source of illumination.

In conclusion, the photochemical effect remains in the radiated objects; therefore, protection mechanisms have to be developed. In this thesis, on the one hand, deep analysis and study of the behaviour of the materials suggest that they can be treated to be more resistant to this type of radiation; and on the other hand, it has been proven that it is possible to generate mechanisms to minimize the damage produced. A methodology has also been developed to evaluate with accuracy the photochemical damage generated by daylight in time and space, and therefore to optimize exhibition policies in historic buildings.

Organización general de la tesis

En esta tesis, se ha realizado un estudio sobre la influencia de la distribución espectral de la radiación visible en la conservación del patrimonio cultural. La descripción del trabajo se ha dividido en siete capítulos.

En el *Capítulo 1. Introducción*, se desarrollan los antecedentes, de patrimonio cultural, incluyendo su definición, su conservación, las motivaciones económicas y culturales para conservar el patrimonio, las causas que provocan su deterioro, la relación que existe entre la radiación visible y el patrimonio cultural, de cómo las características espectrales de la radiación visible influyen en él, el difícil equilibrio entre ambos, los criterios y medios disponibles para aplicar medidas preventivas por las diferentes instituciones para que la luz no dañe el patrimonio y los intentos de llegar a una armonía entre la radiación visible y el patrimonio cultural. El afán de encontrar ese equilibrio es el hilo conductor que justifica la realización de esta tesis.

En el *Capítulo 2. Objetivos*, se desarrollan las metas que se quieren alcanzar en este trabajo. Ya que éstas, plantean formas de evaluar los posibles efectos negativos que produce la radiación visible sobre las obras de arte. La consecución de las mismas ofrece formas de mitigar estos efectos negativos.

En el *Capítulo 3. Análisis del deterioro que produce el efecto fotoquímico. Modelo de daño*, se ha realizado, mediante fuentes de radiación luminosa con diferentes características espectrales, un proceso de envejecimiento forzado sobre tres materiales utilizados habitualmente en obras de arte del patrimonio cultural. Este estudio ha servido para entender el comportamiento de dichos materiales ante el daño producido por la radiación luminosa, y además para caracterizar el daño que producen los iluminantes según sus perfiles espectrales.

En el *Capítulo 4. La iluminación natural aplicada al patrimonio cultural*, se propone una metodología para conocer el comportamiento de la *luz natural* en edificios donde este tipo de iluminación se puede aprovechar por sus características arquitectónicas y para exposiciones donde la *luz natural* forma parte de la propia obra.

En el *Capítulo 5. Conclusiones*, se recogen los puntos clave derivados de esta tesis.

En la *Bibliografía*, se reúnen las referencias bibliográficas empleadas para la realización de esta tesis.

Finalmente, los *Anexos*, contienen datos del autor de la tesis sobre sus publicaciones y la participación en congresos.

Capítulo 1

Introducción

1. *Introducción*

¿Se puede conocer cómo influye la radiación visible desde el punto de vista espectral en el patrimonio cultural? ¿Por qué se produce un cambio de color debido al efecto fotoquímico en ciertos materiales como el óleo, el acrílico y el gouache? ¿Con qué velocidad se produce el cambio de color en las obras de arte debido al efecto fotoquímico? ¿Es posible mejorar la eficiencia en el sistema de iluminación haciendo que dañe lo menos posible a los objetos expuestos del patrimonio cultural? ¿Se puede desarrollar una iluminación selectiva que proporcione una visión correcta de las obras del patrimonio cultural sin deteriorarlas? ¿Cómo aprovechar la radiación visible de la *luz natural* para iluminar espacios donde existan obras del patrimonio cultural?

En esta tesis doctoral se ha intentado obtener respuestas a estas preguntas mediante una aproximación experimental y teórica por medio de métodos que pretenden mejorar la difícil convivencia entre exponer y conservar el patrimonio cultural.

Definir qué se considera como patrimonio cultural, ayuda a entender su importancia y el motivo del desarrollo de investigaciones que ofrezcan soluciones para conservarlo, como las que se presentan en esta tesis. Del mismo modo, describir las medidas y los compromisos adquiridos internacionalmente para conservar el patrimonio cultural, sirve para percibir la trascendencia que éste tiene al mostrar la

identidad de los pueblos, así como en su repercusión en el bienestar económico de cada nación.

Como se cita en “El Plan Nacional de Investigación en Conservación de Patrimonio (PNIC)” español ^[1]:

“El principal valor del patrimonio cultural es, precisamente, el cultural, de carácter intangible y cualitativo. Sin embargo, no se puede olvidar que además de este valor, el patrimonio cultural constituye indudablemente una fuente de riqueza para diversos sectores, generando importantes actividades económicas directamente relacionadas con su identificación, protección, conservación, restauración, gestión y puesta en valor.”

Alonso et al. en 2013 ^[2] señalan que para la Economía de la Cultura el concepto de sostenibilidad tiene especial relevancia, desde una doble perspectiva. Por una parte, la preservación del patrimonio sirve como estrategia para impulsar un desarrollo económico sostenible; por otra, porque la activación de los recursos vinculados con el patrimonio cultural requiere, dada su naturaleza, una utilización responsable de los mismos, lo que impone la sostenibilidad como criterio ineludible.

Exhibir, para que el patrimonio sea cultural y socialmente rentable, y conservar, para que perdure en el tiempo, es ciertamente incompatible. Por este motivo, es necesario realizar políticas de

conservación que ayuden a evitar el deterioro, de forma que las generaciones futuras puedan disfrutar de él.

La conservación, a nivel general, necesita del control o minimización de los múltiples factores, elementos externos e internos, que producen un deterioro en el patrimonio cultural. Estos elementos son motivo de investigación en instituciones ^[3-6] que con equipos multidisciplinares generan diferentes mecanismos, herramientas, métodos y alternativas que buscan el equilibrio y la sostenibilidad entre exhibición y durabilidad.

Entre los diferentes elementos que producen deterioro en el patrimonio cultural se encuentra la radiación visible ^[7]. Para percibir correctamente una obra expuesta, se requieren unos niveles mínimos de radiación visible y que las características de la fuente de iluminación utilizada favorezcan la observación y la reproducción cromática de la obra. Considerada la necesidad de mejorar el conocimiento del comportamiento de la radiación visible sobre el patrimonio cultural, en esta tesis se desarrolla una investigación que examina la radiación visible como agente externo de deterioro y se proponen soluciones para que el uso de esta radiación produzca el menor deterioro en los materiales estudiados.

En el *Capítulo 2* se enumeran y detallan los objetivos concretos del trabajo; en el *Capítulo 3* se estudia el comportamiento de los materiales usados habitualmente en pinturas del patrimonio cultural,

como son el óleo, el acrílico y el guaché a la radiación visible con lámparas tipo *led*; y en el *Capítulo 4* se analiza el comportamiento de la *luz natural* como fuente de iluminación sobre pinturas al óleo.

1.1. *Patrimonio cultural. Definición*

Las definiciones que se utilizan para describir el patrimonio cultural son inevitablemente muy amplias debido la dificultad de englobar su gran variedad, que agrupa objetos tan diversos como edificios, pinturas, paisajes, cuevas, libros, folklore, idiomas, etc. Querol en 2010 ^[8] propone la siguiente aproximación:

"...patrimonio cultural puede entenderse como el conjunto de bienes muebles, inmuebles e inmateriales que hemos heredado del pasado y que hemos decidido que merece la pena proteger como parte de nuestras señas de identidad social e histórica".

La UNESCO, organismo de referencia internacional que marca la tendencia a nivel mundial en estos aspectos, que declara los bienes de interés desde sus instituciones y otorga el máximo galardón que puede obtener un bien cultural, paisajístico, arquitectónico, etc., en su Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial, Cultural y Natural en 1972 ^[5], en los artículos 1 y 2 divide y define el patrimonio cultural en:

- Monumentos, que son las obras arquitectónicas, escultóricas o pictóricas monumentales, los elementos o estructuras de carácter arqueológico, las inscripciones, las cavernas y los grupos de elementos que tengan un valor universal excepcional desde el punto de vista de la historia, del arte o de la ciencia.
- Conjuntos, que son el grupo de construcciones aisladas o reunidas, cuya arquitectura, unidad e integración en el paisaje les otorgue un valor universal excepcional desde el punto de vista de la historia, del arte o de la ciencia.
- Lugares, que son las obras del hombre u obras conjuntas del hombre y de la naturaleza, incluidos los lugares arqueológicos que tengan un valor universal excepcional desde el punto de vista histórico, estético, etnológico o antropológico.

En la misma convención en los artículos 4, 5, 6 y 7 ^[5] se crea un código para la protección nacional e internacional del patrimonio cultural y natural, que compromete a los estados miembros con unos criterios generales sobre obligaciones, recomendaciones y políticas para conservar el patrimonio de cada país. También incluye compromisos para desarrollar medidas jurídicas, científicas, técnicas, administrativas y financieras.

El proyecto “ESSnet-Culture 2012” ^[9], cofinanciado por la Unión Europea, y desarrollado para salvaguardar el patrimonio cultural europeo, lo define como:

“...los elementos físicos como museos, sitios históricos y arqueológicos, y los intangibles como expresiones de vida y tradiciones heredadas, como el idioma que forma parte de la identidad de las comunidades.”

En el caso de España, la Ley 16/1985 de Patrimonio Histórico Español incorpora los avances logrados a nivel internacional y la definición la personalizan adaptando algunos elementos que no se recogen en el congreso de la UNESCO:

“...integran el Patrimonio Histórico Español los inmuebles y objetos muebles de interés artístico, histórico, paleontológico, arqueológico, etnográfico, científico o técnico. También forman parte del mismo el patrimonio documental y bibliográfico, los yacimientos y zonas arqueológicas, así como los sitios naturales, jardines y parques, que tengan valor artístico, histórico o antropológico”.

En la Figura 1.1 se presenta un esquema desarrollado por Querol ^[8] con los tipos de patrimonio, que incluye el patrimonio natural o medioambiental y el patrimonio cultural o histórico recogidos en la Ley 16/1985.



Figura 1.1 Descripción de las diferentes consideraciones de patrimonio cultural [8].

1.2. *La Conservación del patrimonio cultural*

Conservar el patrimonio cultural es imprescindible debido a que existen múltiples causas que provocan su deterioro, a veces agentes externos y otras debido a las características propias del objeto en sí mismo. Por ello es necesario generar políticas que minimicen o eliminen el deterioro, si es posible. En este sentido, los organismos internacionales citados [3,4] se ocupan de definir y acotar los conceptos para conservar el patrimonio.

En el pasado, la conservación estuvo circunscrita casi exclusivamente al entorno profesional del arte y sus diversas ramas, pero en las últimas décadas existe un empeño en concienciar a gobiernos y población para que sean conocedores de esa necesidad. En este sentido el ICCROM (*International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property*) [3], institución utilizada como referencia a nivel mundial por su aportación en

investigación y actividades vinculadas a la conservación del patrimonio, en su congreso de 2009 hace una llamada a la responsabilidad de las personas para preservar su patrimonio cultural ^[10]. Las consideraciones expuestas en el congreso son múltiples. Entre ellas destacan las que subrayan los aspectos culturales y económicos, y las que instan a las instituciones a que formalicen las políticas para cuidar del patrimonio cultural.

Otro referente de organismos que promueven la conservación del patrimonio cultural, es el ICOM-CC (*International Council of Museums, Committee for Conservation*) ^[4], organización internacional de museos y profesionales de museos dedicada a la tarea de conservar el patrimonio mundial natural y cultural. En su congreso trienal en septiembre de 2008 ^[11], se definió el concepto *conservación* en los siguientes términos:

"...Conservación, son todas aquellas medidas o acciones que tengan como objetivo la salvaguarda del patrimonio cultural tangible, asegurando su accesibilidad a generaciones presentes y futuras."

En el mismo congreso, se delimita el concepto de la conservación en tres tipos de medidas o acciones:

- Conservación preventiva: aglutina todas aquellas medidas y acciones que tengan como objetivo evitar o minimizar futuros

deterioros o pérdidas. Estas medidas y acciones son indirectas de modo que no interfieren con los materiales y las estructuras de los bienes. No modifican su apariencia.

- Conservación curativa: todas aquellas acciones aplicadas de manera directa sobre un bien o un grupo de bienes culturales que tengan como objetivo detener los procesos dañinos presentes o reforzar su estructura. Estas acciones sólo se realizan cuando los bienes se encuentran en un estado de fragilidad notable o se están deteriorando a un ritmo elevado, por lo que podrían perderse en un tiempo relativamente breve. Estas acciones a veces modifican el aspecto de los mismos.
- Restauración: todas aquellas acciones aplicadas de manera directa a un bien individual y estable, que tengan como objetivo facilitar su apreciación, comprensión y uso. Estas acciones sólo se realizan cuando el bien ha perdido una parte de su significado o función a través de una alteración o un deterioro pasado. Se basan en el respeto del material original. En la mayoría de los casos, estas acciones modifican el aspecto del bien.

1.3. *Antecedentes*

En esta tesis se pretende desarrollar medidas o acciones que tengan como objetivo evitar o minimizar futuros deterioros o

pérdidas, criterios que se corresponden con la definición de *conservación preventiva*. Por ello, los antecedentes se van a centrar en cómo ha evolucionado y desarrollado este concepto.

El **concepto** de *conservación preventiva* se estima que comenzó a utilizarse en la década de 1950, impulsado por conservadores y restauradores anglosajones, basados en publicaciones realizadas a principios del siglo XX ^[12]. No obstante, tal y como señala Koller en 1994 ^[13]:

“Desde la antigüedad, y más específicamente desde la época medieval, el renacimiento o el barroco, se aplicaban prácticas para la conservación de edificios, pinturas murales, esculturas y pinturas con un enfoque de prevención del deterioro”.

El **nombre** de *conservación preventiva* se acuña como tal en la primera conferencia sobre “La Climatología en el Museo” organizada en Londres en 1967 por el Instituto Internacional para la Conservación (IIC) ^[14], se describe como:

“... la conservación preventiva es el estudio de cómo afecta el medio ambiente al contenido de un museo, y de cómo garantizar que sus procesos de envejecimiento inevitables se retrasan al mínimo. [...] Hoy al igual que en la medicina, el objetivo último es visto como la prevención de la

enfermedad. Por lo tanto, los mejores trabajos científicos y técnicos en los museos es la prevención del deterioro mediante el control del entorno”.

Aunque el interés de conservar preventivamente haya estado siempre presente, en los últimos años es cuando más notable ha sido su empuje. Como refiere García en 2014 ^[15], uno de los primeros hechos destacables tuvo lugar en 1992, cuando se celebró en París el III Coloquio internacional de ARAAFU ^[16] considerado como la primera reunión europea sobre conservación preventiva. Dos años más tarde, en 1994, del 12 al 16 de septiembre se celebró en Ottawa el Congreso del IIC organizado por el Canadian Conservation Institute (CCI/ICC) ^[17]. Este congreso cambia la mentalidad de los profesionales que se encargaban de la preservación de las colecciones en los museos y se elaboran planes de manera sistemática sobre los agentes de deterioro y las medidas de control a tomar. Como referencias del citado congreso hay que destacar a Michalski con su acta *“A systematic approach to preservation: description and integration with other museum activities”* ^[18] y el de Waller con *“Conservation risk assessment: a strategy for managing resources for preventive conservation”* ^[19].

Las instituciones españolas, en conservación preventiva, disponen de una legislación estatal recogida en el Plan Nacional de Conservación Preventiva (PNCP) ^[6] que se formula con la vocación de fomentar la coordinación de esfuerzos y recursos de las diferentes

administraciones competentes, además de promover el desarrollo de la información y la investigación científica y técnica, y para facilitar el acceso de los ciudadanos al patrimonio cultural español.

La necesidad y oportunidad de un PNCP se justifica por la importancia de la implantación de una estrategia de prevención como principio fundamental para la conservación del patrimonio cultural, y las carencias y dificultades existentes para su aplicación en algunas de sus manifestaciones. Este plan se apoya en cuatro líneas de actuación,

- Estudio e investigación.
- Proyectos pilotos.
- Formación.
- Difusión.

En esta tesis los estudios desarrollados en los *Capítulos 3 y 4* están vinculados a los criterios definidos en el tipo de actuaciones de la “*conservación preventiva*”.

1.4. *Motivación*

Existen aspectos culturales y económicos por los que se justifican sobradamente la conservación del patrimonio cultural. Esta tesis toma como referencia la propuesta de estudio sobre conservación preventiva por el Instituto Internacional para la Conservación (IIC) ^[14], “...como afecta el medio ambiente al contenido del museo...”, o

"... los procesos de envejecimiento inevitables retrasarlos...", entendiendo que son circunstancias inevitables a las que están sometidos los objetos, dedicándole a lo expuesto los *Capítulos 3 y 4*, donde se proponen herramientas del estudio del control del medio ambiente en exposiciones y en el proceso de envejecimiento, y ofreciendo sus posibles soluciones.

1.4.1. Aspectos culturales

Las definiciones descritas del patrimonio cultural ayudan a entender que existe una motivación clara para preservarlo. Desde el ICCROM ^[10] se enumeran las siguientes motivaciones para justificar por qué conviene invertir en la conservación del patrimonio cultural:

- Transmite diversos mensajes y valores (históricos, artísticos, estéticos, políticas, religiosas, sociales, espirituales, científicos, naturales, etc.) que contribuyen a dar un sentido a la vida de las personas.
- Representa la identidad de un grupo social.
- Representa un vehículo para la comprensión de la diversidad de las personas y el desarrollo de una política para la paz y la comprensión mutua.
- Es una fuente de desarrollo económico.
- Es único e irremplazable.

1.4.2. Aspectos económicos

Aunque acotar el concepto patrimonio cultural y patrimonio económico es complejo, últimamente estos planteamientos culturales y económicos se están acercando, debido a la ampliación de la perspectiva de la ciencia económica que ha llevado a la consolidación de la Economía de la Cultura como rama científica ^[2]. De acuerdo con las estimaciones del Ministerio de Cultura, el impacto monetario del producto interior bruto (PIB) español, para el período 2000-2012, fue aproximadamente del 3% en el caso de las actividades culturales, según recoge el Anuario de Estadísticas Culturales 2014 del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, en su cuenta Satélite de la Cultura, valores asociados con el patrimonio cultural de España (Tabla 1.1).

A pesar de que España tiene una enorme riqueza patrimonial el impacto económico del turismo cultural en nuestro país es muy débil. Morate en 2013 ^[20] describe que en 2001 sólo el 10% de los extranjeros que visitaron España lo hacía por motivos culturales. En 2010 fue el 14%. Valores muy por debajo, a pesar de su progresivo crecimiento, de los que tienen países con igual o menor riqueza patrimonial como Francia, Reino Unido, Alemania o Austria, que superan ampliamente el 50%.

Tabla 1.1 Aportación de las actividades culturales al PIB en España según anuario de estadísticas culturales de 2014 del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.

	2008	2009	2010	2011	2012
VALORES ABSOLUTOS (Millones de euros)	30.524	29.285	29.446	28.224	26.031
Patrimonio, archivos y bibliotecas	2.010	2.075	2.013	1.954	1.912
Libros y prensa	11.378	10.818	11.359	11.090	10.167
Artes plásticas	5.008	4.615	4.184	4.185	3.750
Artes escénicas	2.334	2.420	2.411	2.293	2.172
Audiovisual y multimedia	8.069	7.667	7.716	6.953	6.310
Interdisciplinar	1.725	1.690	1.764	1.749	1.721
EN PORCENTAJE DEL PIB TOTAL	2,8	2,8	2,8	2,7	2,5
Patrimonio, archivos y bibliotecas	0,18	0,20	0,19	0,19	0,19
Libros y prensa	1,05	1,03	1,09	1,06	0,99
Artes plásticas	0,46	0,44	0,40	0,40	0,36
Artes escénicas	0,21	0,23	0,23	0,22	0,21
Audiovisual y multimedia	0,74	0,73	0,74	0,66	0,61
Interdisciplinar	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17
EN PORCENTAJE DEL PIB CULTURAL	100	100	100	100	100
Patrimonio, archivos y bibliotecas	6,6	7,1	6,8	6,9	7,3
Libros y prensa	37,3	36,9	38,6	39,3	39,1
Artes plásticas	16,4	15,8	14,2	14,8	14,4
Artes escénicas	7,6	8,3	8,2	8,1	8,3
Audiovisual y multimedia	26,4	26,2	26,2	24,6	24,2
Interdisciplinar	5,7	5,8	6,0	6,2	6,6

Uno de los aspectos más positivos de la conservación, y que afectan a su entorno, es el empleo, ocupando a numerosos profesionales en el sector público y privado, como museos, instituciones, centros de empresas especializadas en conservación de bienes muebles, empresas de la construcción que trabajan en la conservación de bienes inmuebles, empresas y laboratorios especializados en estudios o en productos y tecnologías para la conservación, etc. En el año 2008, el número de personas empleadas en Museos y Colecciones museográficas del Ministerio de Educación, Cultura, y Deporte fue de 13.709 y el número de empresas cuya actividad económica principal se encuentra dentro

del epígrafe “*Actividades de bibliotecas, archivos, museos y otras instituciones culturales*” ascendía a 1.391, dando empleo a 38.200 personas.

1.5. *Agentes que deterioran el patrimonio cultural*

El cuidado, la conservación y la exhibición del patrimonio cultural dependen de las condiciones ambientales del entorno donde se exhiben las obras de arte. Los agentes externos que producen daños o pérdidas en las colecciones del patrimonio cultural han sido clasificados a nivel general por diferentes autores ^[21-25]. Michalski ^[7,26-30] los agrupa y describe en diferentes investigaciones, distinguiéndolos en:

- i. Fuerzas físicas directas.
- ii. Robos, vandalismo y pérdida involuntaria.
- iii. Fuego.
- iv. Agua.
- v. Insectos y animales dañinos.
- vi. Contaminantes.
- vii. Radiaciones.
- viii. Temperatura contraindicada.
- ix. Índice de humedad relativa contraindicada.

De los elementos de deterioro descritos, esta tesis principalmente se va a centrar en el agente “Radiaciones” descrito por Michalski, que incluye la radiación visible.

En este estudio se va a analizar cómo afecta de forma directa e indirecta al patrimonio cultural, y se van a proponer soluciones para que su uso, ineludible para poder observar los objetos, dañe lo menos posible el patrimonio cultural.

1.6. *La radiación visible*

1.6.1. Definición

Se considera radiación visible (luz) a la región del espectro electromagnético que el humano es capaz de percibir mediante su sistema visual. Las interacciones de la luz con la materia producen respuestas en los fotorreceptores, (conos y bastones), que activan el sentido de la visión. Por tanto, la luz para el ser humano se puede definir como la radiación que sirve para poder ver los objetos a través del sistema visual ^[31,32]. Por este motivo, y desde el punto de vista de la conservación preventiva, es vital generar mecanismos que faciliten la convivencia entre la exposición a la luz de las obras de arte y la observación de las mismas por parte del ser humano.

Si se analiza desde el punto meramente físico, la luz es una parte del espectro de la radiación electromagnética, cuyo comportamiento, y dependiendo del fenómeno a estudiar,

presenta una dualidad onda-partícula. Si se estudia como partícula, se puede considerar que la luz está compuesta de paquetes discretos de energía E que cuando viajan a través del vacío tienen una velocidad constante de $c \approx 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ [33]. A cada partícula se la denomina *fotón* [34] y tiene asociado un paquete discreto de energía, y su relación según Planck [35] es,

$$E_f = \hbar \nu, \quad (1.1)$$

donde

E_f es la energía del fotón en *Julios*,

\hbar la constante de Planck ($\hbar = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J s}$), y

ν la frecuencia en *Hertzios*.

La unidad de energía usada para el fotón es el electrón voltio eV , donde $1 eV = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$. Las unidades de potencia de la radiación electromagnética usadas en el Sistema Internacional son el *vatio* (W), o el *Julio por segundo* (J s^{-1}).

Cuando la luz interacciona con la materia, la frecuencia ν decrece de forma inversamente proporcional a la longitud de onda (λ),

$$\nu = c/\lambda, \quad (1.2)$$

λ , expresada en nm . Es decir, la energía del fotón E_f con respecto a la longitud de onda λ , se expresa como,

$$E_f = \hbar c / \lambda. \quad (1.3)$$

Esta es otra forma de relacionar la energía del fotón, con las propiedades ondulatorias de la luz [36].

El número de fotones que llegan a un objeto, como por ejemplo cuando se irradia una obra de arte con una fuente a una λ concreta y una irradiancia E , se puede calcular mediante la relación,

$$n_f = \frac{E}{E_f} \quad (1.4)$$

siendo n_f el número de fotones.

Estos conceptos generales sobre la interacción luz-materia están descritos por Allen, Clayton, de la Peña, Schaeffer [31,33,36,37].

1.6.2. Características espectrales de la radiación visible

En el espectro electromagnético la luz, según su longitud de onda, está localizada aproximadamente entre $\lambda = 380 \text{ nm}$ y $\lambda = 780 \text{ nm}$. En la Figura 1.2 se describen los valores energéticos en relación a la longitud de onda de la radiación ultravioleta (UV), visible e infrarroja (IR). La radiación visible se acota en los extremos por el *UV cercano* con una longitud de onda ligeramente más corta y con más energía por fotón que la de la radiación visible, y en el otro lado está el *IR cercano*, que es menos energético por fotón que la radiación visible.


Energía (Electrón Voltio)	12.0	5.0	4.2	3.8	3.4	3.2	3.0	2.6	2.2	2.0	1.8	1.4	1.0	0.6	0.1
Radiación	Ultravioleta			Visible (VIS)							INFRARROJO				
	UVC	UVB	UVA								Cercano	Medio	Lejano		
Longitud de onda (nanometros)	100	280	350	400	450	500	550	600	700	800	2000	3000	10000		

Figura 1.2 Rango Energético de un fotón para la radiación según su longitud de onda, desde 100 a 10000 nm. Energía del fotón en eV.

1.7. El color. Colorimetría

Para definir el color, es necesario usar como referencia el sistema visual humano, que percibe como colores diferentes cada longitud de onda, o las combinaciones de las mismas de la radiación visible.

Judd en 1960 ^[38] propone una definición sencilla del color:

“...El color es el atributo de la luz que hace corresponder a cada distribución espectral una sensación. Esta sensación está condicionada por la intensidad y duración del estímulo, el estado de adaptación del observador, el área de la retina afectada y el contraste luminoso y cromático con que se recibe.”

También se puede definir el color, como una interpretación que hace el cerebro humano a través del sistema visual de cada longitud de onda de la radiación visible.

Estas definiciones indican que el color es un parámetro que tiene una respuesta fisiológica en el sistema visual, y a nivel subjetivo una

respuesta psicológica que está sometida a la interpretación del observador. Este último aspecto hace que sea muy complejo unificar y cuantificar el color, lo que ha dado lugar a multitud de investigaciones y teorías dedicadas a conseguir un consenso sobre una definición común para él. Estas investigaciones tratan, por una parte los modelos de apariencia de color ^[39-44] y por otra los modelos neurales ^[45-53]. Ambas familias predicen descriptores perceptuales, como el tono, la luminosidad y la saturación, pero la diferencia principal entre ellos es que los modelos neurales, además de predecir los descriptores perceptuales, tratan de emular las etapas de procesamiento del sistema visual humano ^[54].

Posteriormente a los modelos de apariencia de color, se observó que lo ideal es obtener un único modelo que recoja la apariencia de color y su diferencia. A menudo, como es el caso en el estudio desarrollado en el *Capítulo 3* de esta tesis, es necesario evaluar diferencias de color entre dos objetos. Por ello, y partiendo de los modelos de apariencia de color, se han definido otros modelos que calculan la diferencia de color entre objetos o el mismo objeto en diferentes tiempos desde su origen ^[55-59]. En el *Capítulo 3*, se describe cómo el cálculo de la diferencia de color ha permitido conocer la magnitud del cambio de color producido en las pinturas después de recibir una cantidad de radiación visible controlada.

La principal autoridad científica en el campo del color es la Comisión Internacional de la Iluminación y Color (CIE), y la

responsable en última instancia del desarrollo de estándares del color.

Debido a la necesidad de cuantificar el color se creó la disciplina denominada Colorimetría, que mide y define los diferentes parámetros observados en el color. Entre otros, ha servido para definir los descriptores perceptuales, del siguiente modo ^[60]:

- El tono: es el atributo de una sensación visual, según el cual una región se asemeja a uno de los colores percibidos como rojo, amarillo verde y azul, o una combinación de dos de ellos.
- La luminosidad: es la propiedad de la percepción visual, por el cual un estímulo luminoso parece emitir más o menos luz.
- El croma o saturación: es la característica de una percepción visual, según el cual cierto estímulo parece más o menos cromático.

Cada descriptor perceptual se define con un valor numérico que se corresponde con un número de referencia para cada color.

Por esta disciplina se ha interesado la CIE en sus normas ^[56], que recogen recomendaciones que han sido divididas en siete grandes grupos, relativas a:

- Los datos físicos normalizados de los iluminantes y de las fuentes.
- A las normas de reflectancia.

- A las condiciones geométricas para la colorimetría.
- A los datos normalizados de los observadores.
- Al cálculo de los valores triestímulo y coordenadas cromáticas.
- A la separación uniforme de color y a la diferencia de color.
- Sobre prácticas y fórmulas colorimétricas diversas.

En los países acogidos a la CIE, por convenio, las especificaciones de normas de colorimetría emanan de ella. Las primeras recomendaciones importantes fueron realizadas por la CIE en 1931^[61], y posteriormente por la División 1 de la CIE, Visión y Color. En este mismo comité de la CIE se determinó el observador patrón, que se detalla en el apartado 1.7.2.

Los modelos de apariencia de color pretenden extender la colorimetría básica al nivel de especificación del color percibido por los estímulos en una amplia variedad de condiciones de visión. Teniendo en cuenta que estos modelos se describen considerando los mecanismos de la visión humana; se hace más sencillo entenderlos si se conoce la anatomía básica, la fisiología y el funcionamiento a nivel general de este sistema.

1.7.1. Sistema visual humano

Es el encargado de detectar, procesar e interpretar los objetos iluminados. A nivel general, este sistema se puede dividir en dos partes (Figura 1.3);

- El sistema óptico u objetivo, formado principalmente por la córnea, la pupila, el cristalino, el humor acuoso y el humor vítreo del ojo. La luz reflejada de un objeto iluminado penetra en el sistema visual a través de estos tejidos transparentes, que permiten focalizar el haz de luz en la retina.
- El sistema neural o subjetivo, formado por la retina, el nervio óptico, el núcleo geniculado lateral, el quiasma y el córtex visual. Este sistema se encarga de procesar e interpretar las imágenes.

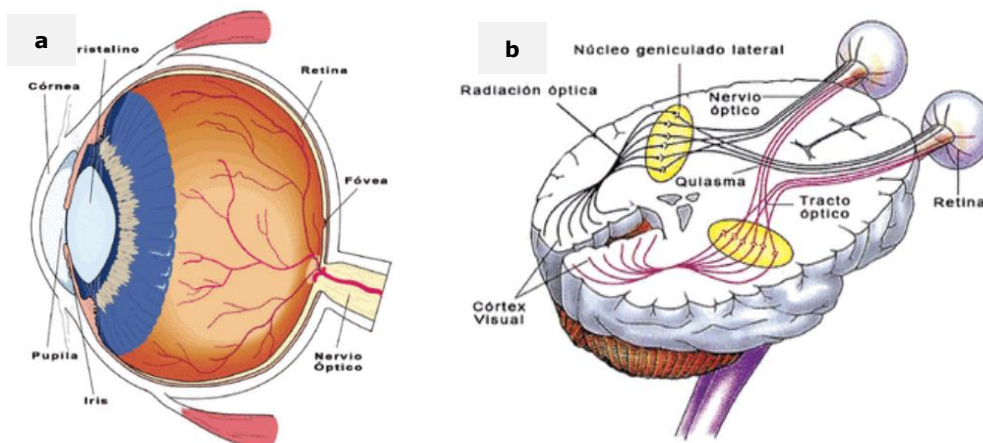


Figura 1.3 Esquema del sistema visual humano, a) estructuras del ojo, sistema óptico. b) estructuras y conexiones neuronales, sistema neural.

Considerando el sistema óptico del ojo, la radiación visible que incide en la retina depende de la calidad de los medios descritos por donde transcurre la luz, y de las posibles aberraciones que presenta cualquier sistema formado por varios medios y lentes, como es el caso del ojo. La cantidad de radiación visible que llega a la retina depende de la pupila y de la fuente. La pupila se dilata

o se contrae (abre o cierra) para permitir el paso de más o menos radiación según la situación lumínica del entorno.

Si se considera el sistema neural de la vía visual, la retina se observa como una continuación del cerebro con un sistema muy complejo de neuronas, células ganglionares, bipolares, amacrinas y horizontales y sus conexiones neuronales a través de los axones, que a su vez activan otras zonas del cerebro relacionadas con el sistema visual, como son el núcleo geniculado lateral o el córtex visual.

Las neuronas fotorreceptoras de la retina son los conos y los bastones. Estas células permanecen activas o inactivas cuando reciben luz, dependiendo de las características espectrales y de la intensidad de la radiación.

Según la intensidad con la que sean iluminados los conos y los bastones, se identifican tres tipos de comportamientos en la visión [32]:

- Visión escotópica: se produce cuando la luminancia recibida en la retina es menor de $0,001 \text{ cd m}^{-2}$. En esta situación los bastones se activan mientras los conos permanecen desactivados. Este estado es una característica de la visión nocturna o en baja luminancia.
- Visión fotópica: se ocasiona cuando la luminancia recibida en la retina es mayor de 3 cd m^{-2} . En este estado los conos

permanecen activados mientras los bastones están desactivados.

- Visión mesópica: se origina cuando la luminancia recibida en la retina está situada en valores entre $0,001$ a 3 cd m^{-2} . En este estado tanto los conos como los bastones están activados.

Para cada comportamiento del sistema visual y con los valores de luminancia descritos, se observa que los bastones son más sensibles a la luz que los conos. Por otra parte, los conos tienen la capacidad de diferenciar las características espectrales de la luz utilizada.

Hay tres tipos de conos, L, M y S, y su comportamiento depende de la longitud de onda de la luz, activándose o desactivándose (ON-OFF) según las siguientes características (Figura 1.4):

- Tipo L: estos conos son sensibles a longitudes de onda larga, es decir a los rangos donde se encuentran los colores rojos.
- Tipo M: estos conos son más receptivos a longitudes de onda medias, es decir a los rangos donde se encuentran los colores verdes.
- Tipo S: excitables a longitudes de onda corta, es decir a los rangos donde se encuentran los colores azules.

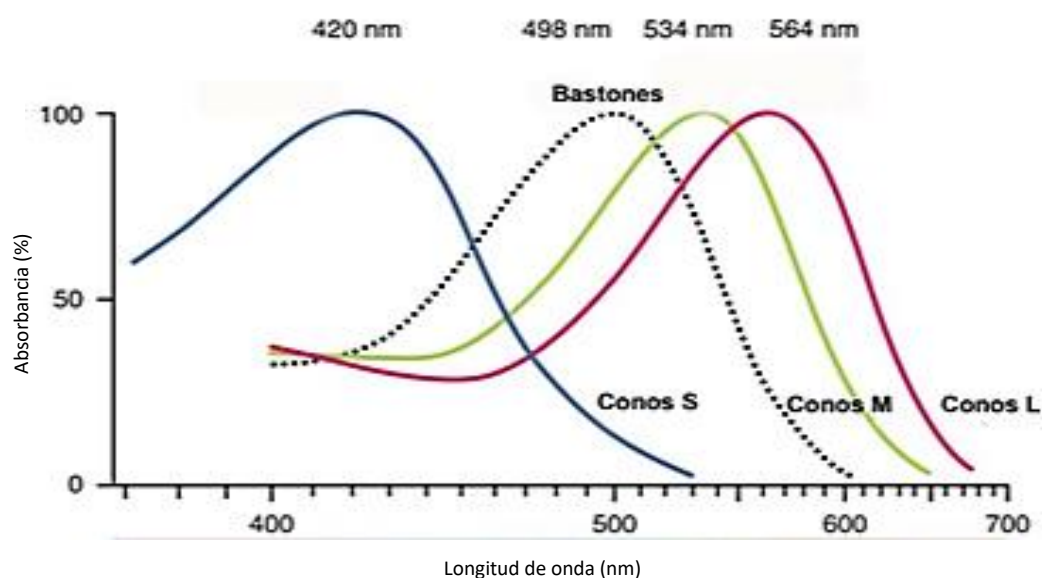


Figura 1.4 Curvas de sensibilidad espectral de los tipos de conos S, L, M y de los bastones. La absorbancia normalizada en %.

Por tanto, los conos son los responsables de la visión de diferentes colores. Conociendo que el color es una interpretación del sistema visual humano para diferenciar los espectros que componen la radiación visible, así los objetos, se diferencian con sus distintos colores, debido a las longitudes de onda del espectro visible que éstos reflejan cuando son iluminados. El color del objeto será interpretado en su amplitud siempre y cuando la fuente luminosa contenga todo el espectro de la radiación visible, o en su defecto, las longitudes de onda que corresponden al color del objeto.

Se pueden crear estímulos de color con la fuente de luz utilizada mediante mezclas de color de dos tipos, *aditivas* o *sustractivas*. Las *aditivas* se obtienen con la superposición de tres fuentes de luz de color rojo, verde y azul, los denominados colores primarios. La mezcla de estas tres fuentes con la misma intensidad produce luz

blanca. Si se varia la intensidad, el tono y la saturación de las tres fuentes se consiguen toda la gama de colores. En el caso de las *sustractivas* se realiza utilizando fuentes cuya mezcla resta color a las otras. En este caso las fuentes utilizadas son de color cian, magenta y amarillo. La mezcla de estos tres colores con igual intensidad elimina todos los colores, y se obtiene el color negro.

El comportamiento aditivo del color se describe con los principios formulados por Grassmann en 1853, que determinó cuatro leyes sobre la igualación del color, desarrolladas por Valero en 2013 [62]:

- i. Ley de la Trivarianza visual. Una misma sensación cromática $L_c(C)$ puede obtenerse mezclando tres radiaciones monocromáticas del espectro visible, $L_r(R), L_g(G), L_b(B)$, si se hace en las proporciones adecuadas, a condición de que ninguno de ellos se pueda igualar por una combinación de los otros dos, o sea, que ninguno de los tres estímulos visuales elegidos como primarios pueda obtenerse por mezcla de los otros dos.

$$L_c(C) = L_r(R) + L_g(G) + L_b(B) \quad (1.5)$$

- ii. Ley de la Luminancia. La luminancia de una mezcla de colores es igual a la suma de las luminancias de los colores que la componen. De la ecuación (1.5), cuando se ha conseguido la igualdad de color C, la luminancia del mismo es igual a la

suma de las luminancias de los colores primarios utilizados en la igualación.

$$L_c = L_r + L_g + L_b \quad (1.6)$$

Las luminancias en *candelas m⁻²* .

En el experimento de Grassmann para obtener el color blanco de forma aditiva propone sus propias unidades tricromáticas *T*, que están relacionadas con el flujo luminoso en lúmenes de la siguiente forma:

1 unidad *T* de rojo $\rightarrow l_1 = 0,30$ lúmenes de rojo.

1 unidad *T* de verde $\rightarrow l_2 = 0,59$ lúmenes de verde.

1 unidad *T* de azul $\rightarrow l_3 = 0,11$ lúmenes de azul.

De la ecuación (1.5), para el blanco sería:

3 unidades *T* $\equiv 0,30 + 0,59 + 0,11 = 1$ lúmen de blanco.

- iii. Ley de la Proporcionalidad. Siempre que dos superficies produzcan igual sensación cromática, es posible variar su luminancia manteniendo constante el matiz y la saturación, sin que varíe la igualdad cromática entre ambas superficies. Si dos estímulos luminosos *A* y *B* producen la misma sensación de color, esta igualdad se mantiene cuando la luminancia de cada una de ellos se multiplica por un mismo número o una misma cantidad *k*: Si $A \equiv B \rightarrow kA \equiv kB$

- iv. Ley de la Aditividad. Si una misma cantidad de un estímulo luminoso o color C se adiciona o superpone a dos colores A y B metámeros, la mezcla aditiva también es metámera:

Si $A \equiv B$ y $C \equiv D$ se puede decir que $A + C \equiv B + D$

Dos colores son metámeros si proceden de estímulos distintos, pero son percibidos como colores iguales. Sin embargo, dos colores distintos procederán siempre de estímulos (distribuciones espectrales) diferentes.

1.7.2. El observador estándar. CIE 1931

La interpretación del color por parte de cada sistema visual es lo que hace complicado igualar el concepto del color; y por ello, la CIE formula un modelo general que unifica el comportamiento del sistema visual humano, y para ello propone un "observador estándar" del color. La CIE se ha basado en la teoría de la colorimetría tricromática (R, G, B). Para el desarrollo de esta teoría, se realizaron medidas mediante observadores que intentan igualar un color dado C mediante tres colores R, G, B . El observador modifica los valores R, G, B hasta que consigue, de forma subjetiva, el mismo color que C . Cuando se alcanza la igualación se obtienen los valores triestímulo o componentes tricromáticos l_1, l_2, l_3 que se utilizarán para desarrollar la teoría del observador estándar. Este concepto coincide con la síntesis aditiva de Grassmann y la ecuación tricromática del color, de la forma:

$$c(C) = l1(R) + l2(G) + l3(B), \quad (1.7)$$

Para normalizar las medidas, los colores primarios R, G, B , son valores espectrales constantes $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ que tienen su valor máximo en 700 nm , $546,1\text{ nm}$ y $435,8\text{ nm}$ respectivamente, con una anchura espectral de $\pm 2,5\text{ nm}$.

En el experimento se comprobó que existen algunos colores que no pueden ser igualados por este método si no se añade una cantidad de rojo al estímulo patrón y por ello aparecen cantidades negativas en $l1(R)$ (Figura 1.5).

Para evitar valores negativos en unidades de luminancia que no tienen consideración en física, la CIE 1931 modifica los primarios, denominándolos estándar de igualación de color o estímulos de referencia X, Y, Z . Estos primarios no se corresponden con estímulos de color reales, sino que son distribuciones espectrales que surgen al imponer las condiciones de que no haya coordenadas cromáticas negativas para ninguno de los colores existentes y que el primario y se corresponda con la curva de eficiencia luminosa espectral definida por la CIE. Los valores X, Y, Z se obtienen mediante una transformación matricial $[M]$ del espacio R, G, B convirtiendo a todos los coeficientes en valores positivos (Figura 1.6).

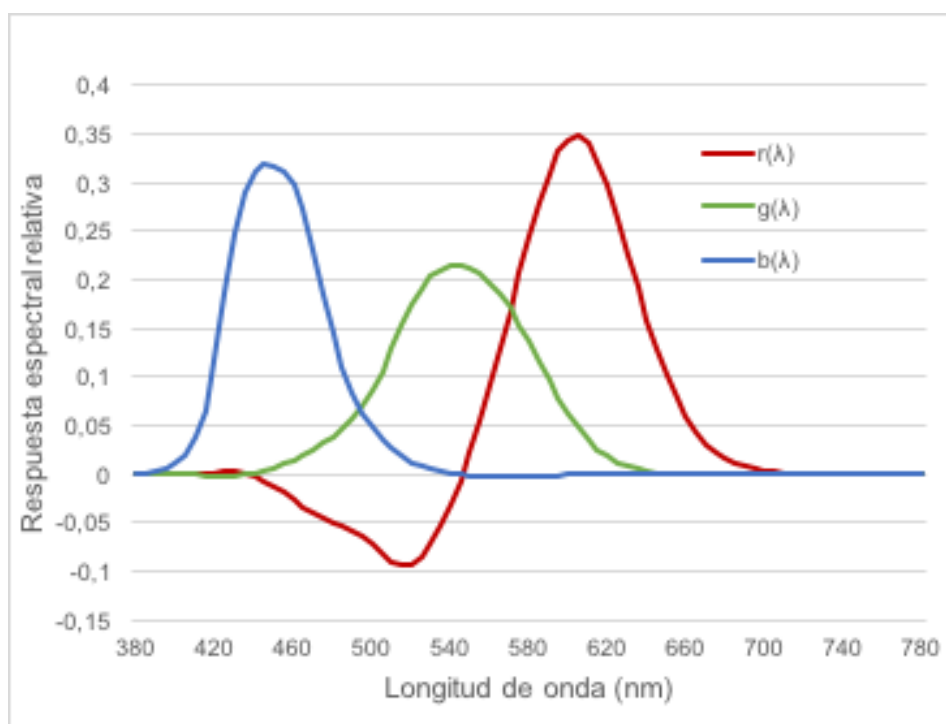


Figura 1.5 Funciones de igualación de color $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ del Observador estándar CIE 1931.

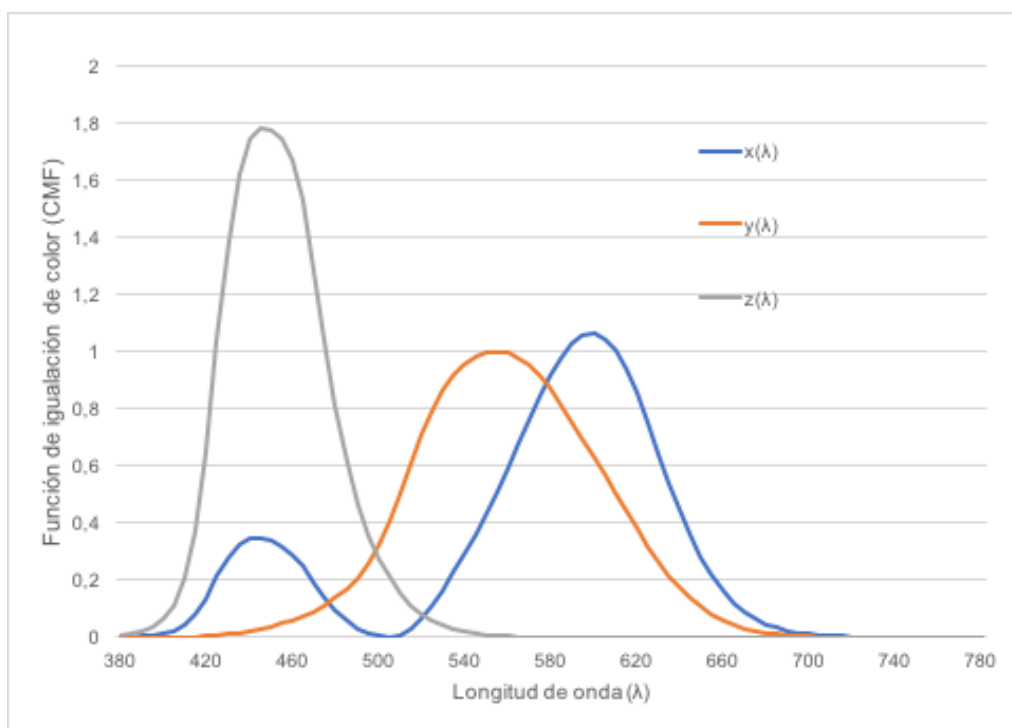


Figura 1.6. Funciones de mezcla de los primarios $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ para el observador estándar CIE 1931. Función de igualación de color (CMF).

Para obtener esta condición la CIE aplicó los siguientes escenarios (Figura 1.7):

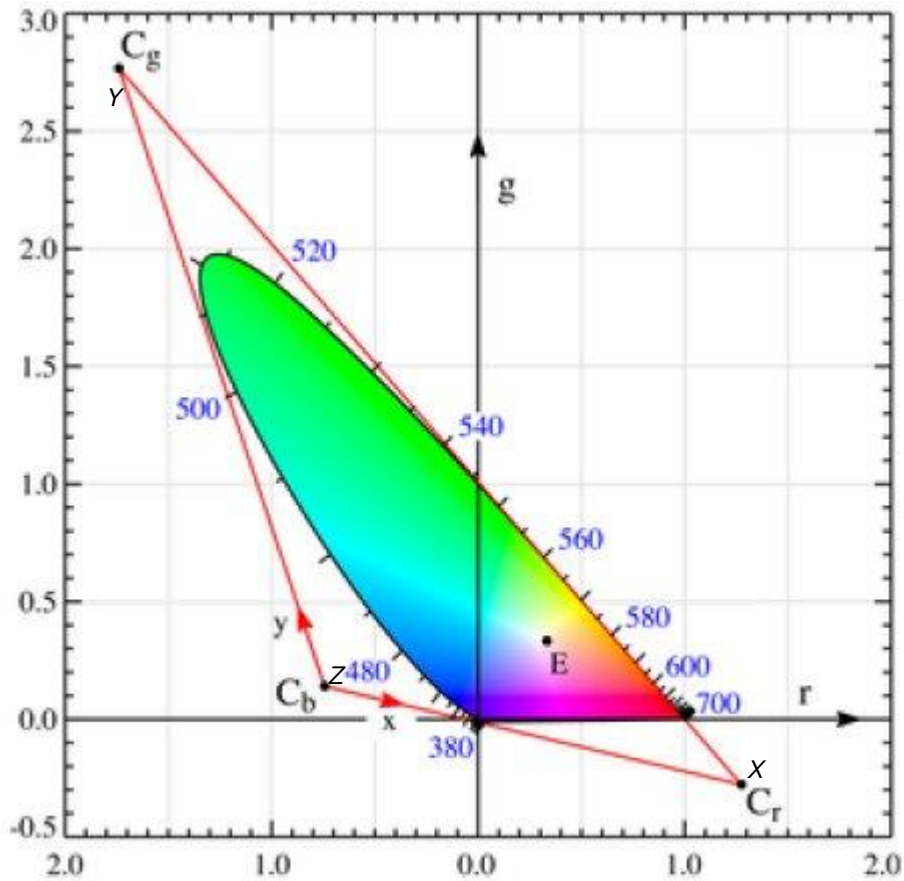


Figura 1.7 Diagrama CIE 1931 X, Y, Z.

- i. El valor triestímulo Y lleva la información del flujo luminoso, codificando la luminosidad.
- ii. El lado del triángulo XZ define colores que carecen de luminosidad, siendo Y la que aporta la luminosidad.
- iii. Los lados del triángulo XY e YZ son tangentes al espectro que definen los primarios en el diagrama cromático.
- iv. El punto E de la Figura 1.7, tiene valores triestímulo iguales, que corresponde con el blanco teórico, situado en el centro del lugar espectral. $x = y = z = 0,33$.
- v. El lado XY será la hipotenusa del triángulo, que representa el croma en x, y , donde

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}; y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad (1.8)$$

y, por otra parte, conociendo dos variables x, y podemos conocer z , por la igualación

$$x + y + z = 1; z = 1 - x - y. \quad (1.9)$$

- vi. Una de las funciones de igualación $\bar{y}(\lambda)$ coincide con la función de sensibilidad espectral fotópica del sistema visual humano $V(\lambda)$.

$V(\lambda)$ es la curva espectral de eficiencia luminosa de la retina para el observador estándar. El comportamiento de la retina depende de la iluminación produciendo visión fotópica y escotópica a alta o baja intensidad respectivamente. Por ello, se obtienen dos curvas espectrales de eficiencia luminosa diferentes (Figura 1.8), $V(\lambda)$ visión fotópica cuyo valor máximo de sensibilidad se encuentra en 555 nm y visión escotópica $V'(\lambda)$ cuyo máximo está situado en 507 nm .

Las consideraciones de la CIE para obtener el observador estándar fueron:

- a) que la intensidad de la iluminación provocara visión fotópica,

- b) que se limite la imagen al observador a dos grados de la visión central de la retina, en concreto a la zona foveal, y
- c) no considerar el concepto perceptivo del observador.

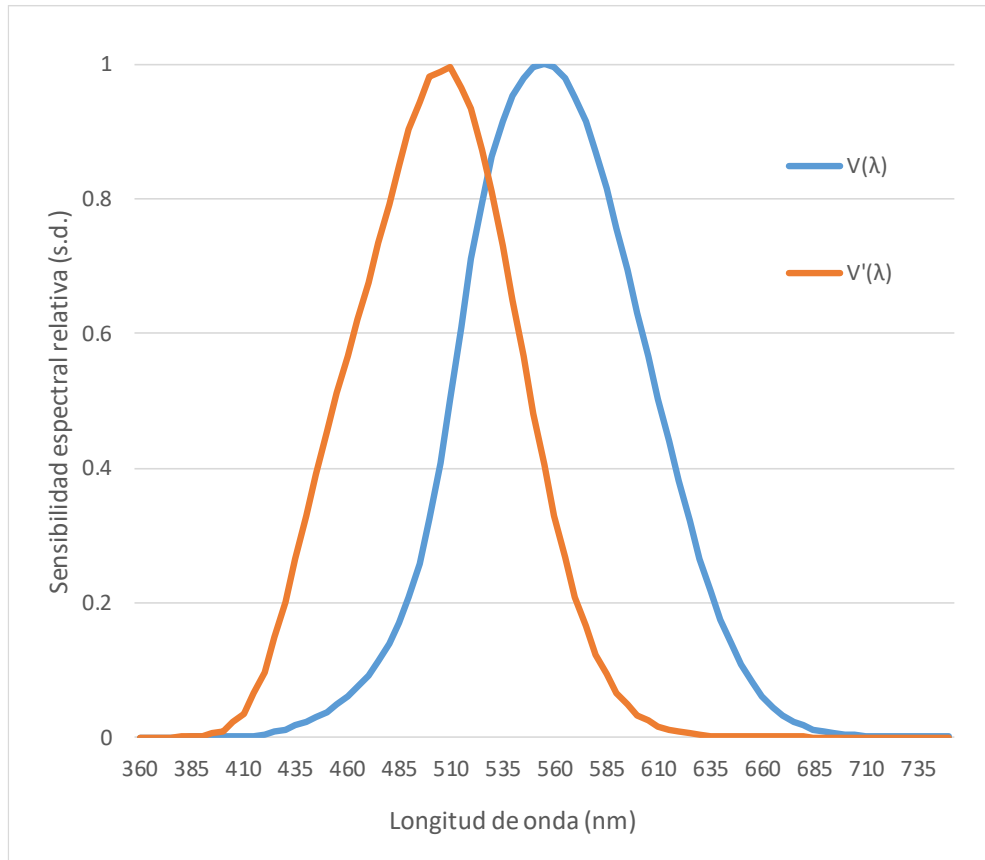


Figura 1.8 Curva de sensibilidad espectral de visión fotópica $V(\lambda)$ y escotópica $V'(\lambda)$ [63].

1.7.3. Índice de reproducción cromática (IRC)

Los colores que se aprecian en los objetos dependen de las características cromáticas de la fuente de luz que se esté utilizando. Cuando se describe la naturaleza cromática de los mismos se debe considerar el espectro de la fuente y cómo se reproducen sus colores al iluminarlos. En esta evaluación se utilizan dos parámetros: la temperatura de color, que se mide en

°K y el rendimiento de color de la fuente, que se mide con el índice de reproducción cromática (IRC).

El IRC mide la variación de color que experimentan los objetos al ser iluminados con una fuente de luz en comparación con el color que esos mismos objetos muestran cuando son iluminados por una fuente de luz de referencia. Esta fuente de referencia está considerada como ideal y tiene que tener la misma temperatura de color que la luz estudiada, aunque con una baja eficacia.

En la práctica se distinguen tres categorías:

- IRC 90 y 100 – excelente reproducción del color.
- IRC 80 y 90 – buena reproducción del color.
- IRC 60 y 80 – presentara distorsión en algunos colores. No apto para lugares con permanencia de personas.

La norma recomienda que el IRC como valor óptimo sea mayor de 85 ^[64].

El IRC, como índice de medida de color, se encuentra muy cuestionado por diferentes autores en este momento y se buscan métodos que puedan ser más fiables en la medida del rendimiento de color para los diferentes tipos de iluminación y que estén adaptados al observador ^[65-68].

1.8. *Sistemas de iluminación en los museos*

El sistema de iluminación usado en el patrimonio cultural debe tener en cuenta dos cosas: el tipo de obra de arte a iluminar y la necesidad del uso de fuentes de luz artificiales o naturales. El enfoque acertado debe ser iluminar el objeto de modo que se asemeje lo más posible a la idea que tenía el artista ^[69]. Estos sistemas deben ser controlados para que la visualización sea de la máxima calidad y deben cumplir que sus condiciones lumínicas no dañen los materiales. La calidad de la luz es esencial, pero no es el único factor que mejora la experiencia visual de los visitantes. También hay que considerar la dirección y colocación de las fuentes de luz para evitar deslumbramientos y reflejos, además de las propiedades de distribución espectral de las fuentes utilizadas.

Desde el punto de vista de la distribución espectral del sistema de iluminación utilizado, todas las longitudes de onda de la luz pueden inducir daño en las obras del patrimonio cultural, pero las longitudes de onda más cortas, debido a que poseen una carga energética superior, se consideran más perjudiciales. Hay que considerar que los efectos negativos de la iluminación no están solo relacionados con la longitud de onda, también influyen las características del objeto. Por ejemplo, si el material estudiado tiene una apariencia azulada, en cierta medida puede estar más protegido de los posibles daños de la radiación a longitudes de onda más cortas, ya que

absorberá menos energía en estas longitudes de onda por sus características intrínsecas [70,71].

Otro aspecto sensible en el diseño de estos sistemas es la intensidad de la iluminación, ya que niveles bajos de intensidad pueden comprometer la experiencia visual del público, y niveles altos pueden dañar las obras. Los estudios previos del control de la intensidad en los sistemas de iluminación en el patrimonio cultural, indican que en un principio se basaban en datos relativos según especifica en su artículo Leo en 1982 [72]:

"...Las sugerencias actuales, en particular las relacionadas con la iluminación, se han establecido de manera bastante arbitraria, ya que las recomendaciones de los científicos se han fijado en niveles de intensidad muy bajos y dentro de lo razonablemente posible sin la firme evidencia de que son los necesarios" "...el motivo se debe a que se trata de proteger la obra y todas las medidas son óptimas, aunque se utilicen valores sin evidencia..."

Por otra parte, había poca investigación que tuviera en cuenta las limitaciones impuestas por el sistema visual humano en el campo donde el observador ve las obras de arte, ya que estaban dirigidas a generar ambientes de iluminación agradables [73] o en la mejora

de las condiciones de trabajo ^[74] de los artículos no vinculados al arte, donde no se habían considerado los niveles de intensidad.

En los cálculos realizados en esta tesis, se van a utilizar valores de intensidad radiométricos, y de hecho se recomiendan para el diseño de sistemas de iluminación para el patrimonio cultural, debido a que utilizar solo valores fotométricos para obtener la cantidad de luz, en lugar de radiométricos, puede conducir a un error en la valoración del daño que puede ocasionar al objeto. La iluminancia, medida fotométrica, es un cambio de escala de la irradiación por la función estándar de luminosidad fotópica humana. Esta función en gran medida resta importancia a las longitudes de onda cortas de la radiación visible, que son en la mayoría de los casos particularmente perjudiciales ^[75].

Otro aspecto esencial a la hora de diseñar sistemas de iluminación en el patrimonio cultural es la temperatura de color de la fuente, que se relaciona con la intensidad y con el comportamiento del sistema visual a la hora de observar objetos. En 1941 Kruithof ^[76] señaló que con intensidades bajas había un estrecho rango de temperaturas de color agradables para el observador, de 2200 – 2500 °K a 50 *lux*, y que a medida que aumentaba la intensidad, el rango de temperatura de color se ampliaba y se desplazaba hacia valores más altos, 2700 – 3600 °K a 200 *lux*. Davis y Ginthner en 1990 ^[77] resumen algunos casos de investigaciones posteriores que no pudieron confirmar los hallazgos de Kruithof, donde no se relacionan las temperaturas de

color preferidas para el observador con la intensidad de la fuente. Estos estudios no son directamente relevantes, ya que recogen las preferencias de las personas sobre la mejor manera de iluminar una habitación y no sobre la forma de ver el arte o incluso de algo tan básico como la discriminación de color o la apariencia del color. Por otra parte, la investigación considera sólo dos temperaturas de color ($2750 - 5000 \text{ }^{\circ}\text{K}$) y las iluminancias utilizadas, $250 - 1300 \text{ lux}$, son demasiado elevadas para poder usarlas en la mayoría de los objetos sensibles del patrimonio cultural.

Feller en 1968 ^[78] recomienda unas normas convencionales para iluminar museos, que especifican que se utilice una iluminancia entre 50 y 200 *lux*, con una temperatura de color de aproximadamente 3000 $^{\circ}\text{K}$. Estos límites se basaron en estudios prácticos obtenidos a partir de informes de una serie de importantes museos. Los niveles bajos de iluminancia se utilizaron para una mejor conservación de materiales más sensibles, y el espectro típico utilizado estaba determinado por fuentes de luz artificiales estándar normalizadas por la CIE ^[79,80] como son los iluminantes tipo A o D65.

Kesner en 1993 ^[81] por medio de cuestionarios a los visitantes, hizo un intento de evaluar la satisfacción de la iluminación de la exposición del museo según las recomendaciones establecidas en 50 *lux* en varios museos importantes. La conclusión principal fue clara: los espectadores se mostraron molestos con la iluminación

existente, aunque reconocieron que para la conservación podría ser necesaria que esta fuera baja.

Scuella en 2004 ^[75] investigó con varios iluminantes las temperaturas de color preferidas para el observador. Una conclusión importante es que no mostraron una preferencia abrumadora por ninguna. Estos resultados llevan implicaciones para algunas prácticas a la hora de iluminar el patrimonio cultural:

- i. Si es posible, la fuente luminosa debe tener una temperatura de color sensiblemente más elevada que la iluminación habitual, aproximadamente 3000 °K. Los datos obtenidos apuntan a un valor de 3600 °K.
- ii. Los iluminantes de la luz del día con una temperatura aproximada de 5500 – 6500 °K son, en general, también bien aceptados.
- iii. Además, las temperaturas elevadas, 5500 – 6500 °K , muestran una clara interacción con el color dominante de una pintura, cosa que no ocurre a 3600 °K.

Otros diseños, pueden ser sistemas de iluminación que aprovechen la *luz natural*, que no se contemplan habitualmente debido a que incluso si se eliminan los rayos UV, son problemáticos, ya que los valores varían de forma continua tanto al aire libre como si la ubicación de la obra del patrimonio es en salas cerradas ^[82]. No obstante, estos sistemas no deben ser descartados, ya que existen

obras del patrimonio cultural para las que, por sus características artísticas específicas, la *luz natural* es un complemento óptimo. Esto unido a los avances tecnológicos, tanto en dispositivos de control como en metodologías y capacidades de cálculo, hacen que la *luz natural* cobre un renovado papel en la iluminación del patrimonio cultural.

Como indica Goldstein en 2008, sean cuales sean las opciones de iluminación impuestas por la ingeniería, o por las necesidades de conservación de arquitectura, las decisiones finales también deben hacer frente a la visión humana ^[32]. La ventaja que presenta el sistema visual humano es que no es uniforme en sus propiedades y se comporta fundamentalmente de forma no lineal: las respuestas a la estimulación de la parte central del campo visual difieren de las de la periferia, y por ello el sistema en su conjunto se adapta a la iluminación ambiente. Por lo tanto, la sensibilidad a diferentes partes del espectro cambia continuamente con la cantidad de luz usada en toda la gama en los museos. Otra cuestión son los cambios de temperatura de color en la fuente de iluminación, que pueden producir diferencias en los estados de adaptación de los tres tipos de conos, y de cuya respuesta se deriva la visión del color. Por ello, las apariencias de las superficies que reflejan una amplia mezcla de longitudes de onda (como ocurre con la mayoría de los pigmentos

de los artistas) se cambian a medida que la fuente luminosa transforma el color ^[83].

Se entiende que todo diseño luminotécnico es un proceso que implica proyectar, coordinar, seleccionar y organizar un conjunto de elementos para crear ambientes lumínicos destinados a fines específicos. Conlleva aspectos personales del diseñador y del observador. Por tanto, no existe un ambiente lumínico totalmente perfecto, sino que es una tendencia subjetiva siempre susceptible de ser mejorado. En esta tesis se ofrecerán datos objetivos con los que se pueden mejorar los diseños, superando la subjetividad del observador.

1.8.1. Fuentes luminosas utilizadas en patrimonio cultural

Los criterios generales que se usan en las fuentes luminosas son la eficacia, las características cromáticas y su duración. A estos criterios, y teniendo en cuenta la obra del patrimonio cultural iluminada hay que añadir que las características espectrales y que la intensidad de las fuentes interfiera lo menos posible con ella.

Los iluminantes patrón que recomienda la CIE ^[79] para iluminar el patrimonio cultural, como son el iluminante *A* y el *D65*, cuyas características espectrales y de reproducción cromática son ideales. Éstos han sido trasladados a la industria luminotécnica, copiando los perfiles diseñados teóricamente.

El iluminante A, cuyo espectro en la industria se reproduce con las lámparas incandescentes, está muy extendido en la iluminación de interiores y en museos. Las características de estas lámparas en estos espacios son de 2800 °K como temperatura de color ideal, y su IRC es 100. En este tipo de lámparas hay que tener especial cuidado de no elevar la temperatura de color por encima de los 3100 °K ya que aumenta considerablemente la radiación UV y la IR. Históricamente, el motivo por el que la CIE [79] recomienda este tipo de lámparas es que tienen una emisión de longitudes de onda cortas reducida, aminorando así el daño cuando se compara con la luz diurna indirecta o fluorescente con mayor radiación de longitud de onda corta y mayor energía.

En el caso del iluminante D65, en la industria luminotécnica se utilizan lámparas de tipo fluorescentes, cuyo espectro es similar al de la radiación solar en un día despejado.

Actualmente se está incorporando iluminación *led* blanca al diseño de alumbrado en museos, gracias al aumento de su eficiencia luminosa, su bajo consumo, la baja tensión, la baja temperatura a la que trabajan, su rapidez en la respuesta de encendido, la mayor duración y su disminución en los costes de fabricación. La tendencia actual es trabajar con luminarias *led*, sobre las que varios autores han mostrado en parte su viabilidad y su idoneidad para iluminar exposiciones de arte [84]. En general,

la iluminación *led* blanca es ventajosa para la conservación del arte, porque no emite radiación UV e IR y su radiación visible se reduce en comparación con su espectro continuo equivalente ^[84].

Capítulo 2

Objetivos

2. *Objetivos Generales*

- i. Averiguar la respuesta espectral de pinturas al óleo, acrílicas y gouaches, dependiendo del tiempo y de la cantidad de radiación visible recibida por la pintura.
- ii. Desarrollar un modelo espectral teórico del deterioro fotoquímico producido por la radiación visible, considerando las características espectrales, en las pinturas al óleo, acrílicas y gouaches, que proporcione a los restauradores y responsables de museos, según el tipo de pintura, información del proceso de envejecimiento en relación con el tiempo y con la cantidad de radiación recibida.
- iii. Proporcionar información real de la incidencia espectral de la iluminación *led* en materiales usados en Patrimonio Cultural, pinturas al óleo, acrílicas y gouache.
- iv. Estudiar el comportamiento de la *luz natural* en edificios con exposiciones permanentes del patrimonio cultural.
- v. Generar una herramienta que facilite la obtención de las características espectrales de la *luz natural*, dependiendo del clima, de la hora del día y de la época del año, en

edificios del patrimonio cultural con este tipo de iluminación.

- vi. Identificar los posibles inconvenientes y ventajas de usar la *luz natural* en exposiciones permanentes del patrimonio cultural.
- vii. Generar mecanismos que faciliten el uso de la *luz natural* en edificios del patrimonio cultural con exposiciones permanentes.
- viii. Proponer soluciones ante los inconvenientes para no desestimar el uso de la *luz natural* en edificios del patrimonio cultural con exposiciones permanentes.

Capítulo 3

Análisis del efecto fotoquímico en bienes del patrimonio cultural

3. *Análisis del deterioro que produce el efecto fotoquímico. Modelo de Daño*

Resumen

El presente capítulo está dividido en dos bloques. El primero, muestra un desarrollo teórico de los conceptos generales sobre la interacción de la luz con la materia y su conexión con la conservación preventiva del patrimonio cultural, además de una relación de los estudios previos que describen cómo afecta a los objetos expuestos la iluminación. En el segundo, se presenta un análisis sobre la variación del comportamiento espectral de los materiales utilizados habitualmente en obras del patrimonio cultural cuando son sometidos a una radiación visible. Los elementos utilizados en el estudio son pinturas al óleo, acrílicas y gouache (*muestras*). El fin es observar el comportamiento de estos materiales cuando se han irradiado con una fuente de luz visible (*led*) con siete longitudes de onda diferentes desde 447 nm hasta 627 nm . Radiar de forma controlada, durante un periodo de tiempo suficiente, tiene el objetivo de producir cambios en la reflectancia espectral en las *muestras* utilizadas. Con los valores obtenidos en la medición de estos cambios, se ha desarrollado un modelo espectral sobre el efecto fotoquímico en los materiales utilizados, que abarca la relación entre la variación del color y la propia evolución temporal del sistema, todo ello en función de la cantidad de radiación recibida en cada longitud de onda. Con los

resultados se han visualizado dos comportamientos; en el primer nivel de análisis, se ha estudiado la relación espectral, que ha servido para modelizar el proceso de envejecimiento experimentado por las *muestras* cuando están sometidas a una cantidad de radiación con una distribución espectral específica; el segundo nivel de análisis, ha servido para determinar la variación temporal de la respuesta espectral del material utilizado en las *muestras*.

Objetivos específicos

- i. Justificar, mediante el análisis de investigaciones previas, la necesidad de generar procesos de envejecimiento que contribuyen a la comprensión del comportamiento de los materiales utilizados en obras del patrimonio cultural.
- ii. Diseñar, fabricar y poner en marcha un proceso de envejecimiento espectral por efecto fotoquímico en el rango visible en pinturas habitualmente utilizadas, como son el óleo, el acrílico y el gouache en obras de arte del patrimonio cultural, controlando las condiciones medioambientales de humedad y temperatura.
- iii. Desarrollar un modelo de daño espectral de radiación visible para cada tipo de pintura.
- iv. Desarrollar un modelo del comportamiento espectral de los materiales que además integre la componente temporal.

- v. Proponer una herramienta de cálculo y simulación, que anticipe el comportamiento de la reflectancia espectral de las pinturas utilizadas en restauraciones de cuadros, donde se utilicen materiales como el óleo, el acrílico o el gouache.

3.1. *Preliminares*

En este capítulo se ha desarrollado una investigación siguiendo la línea de la conservación preventiva ^[11] expuesto en el *Capítulo 1*. El factor de riesgo a controlar es la radiación utilizada para iluminar las obras de arte del patrimonio, en concreto el rango del espectro de radiación electromagnética que comprende el ultravioleta (UV), el visible y el infrarrojo (IR). El fin es que se utilice un sistema de iluminación que permita visualizar correctamente las obras del patrimonio, de modo que la cantidad de energía recibida por el objeto iluminado produzca el menor daño posible, y a su vez, que la percepción de los objetos sea de la máxima calidad posible. Este concepto es la inspiración de investigaciones que comenzaron en el siglo XX ^[85,86], que aún continúan ^[24,87] y el motivo del trabajo desarrollado en este capítulo ^[88].

Es necesario conocer cómo afecta este tipo de radiación a la materia orgánica e inorgánica, ya que se ha comprobado que el efecto fotoquímico y la acción de la propia radiación térmica produce cambios no deseados en ella. Un mejor conocimiento del comportamiento de los elementos usados en las obras de arte ante estos efectos evitará, o como mal menor, minimizará que los bienes del patrimonio cultural se vean afectados por estos cambios ^[78,89].

La luz actúa como un catalizador del proceso de oxidación que acelera el deterioro de los materiales. Los daños observados en los objetos del patrimonio cultural producen un aumento de la fragilidad de las fibras del papel y la madera, decoloración y oscurecimiento del papel, pérdida de color de los colorantes, corrosión en los tejidos naturales, decoloración de la madera y de otros materiales usados en las obras de arte sensibles a la luz, etc. [90].

Obviamente, la exposición de los elementos del patrimonio cultural a la radiación electromagnética, en concreto a la visible ¹, es imprescindible para su observación. Pero el estudio completo del daño que produce la radiación debe considerarse el provocado por la visible, el UV y la térmica IR, esta última puede originar aumentos o cambios bruscos de temperatura en las superficies de los objetos expuestos, actuando como un activador del efecto fotoquímico [86,91-95]. Por todo ello, se debe encontrar un sistema de iluminación que irradie y produzca el menor daño sobre el patrimonio. En esa búsqueda, el estudio desarrollado en este capítulo [88] está orientado a observar, cuantificar y medir el comportamiento de ciertos materiales del patrimonio cultural utilizados habitualmente en museos o salas de

¹ En el texto, la radiación visible se nombrará también como iluminación, luz, luz natural, etc., sinónimos que se identifican con la forma de iluminar los objetos.

exposición expuestos a un sistema de iluminación *led* con siete longitudes de onda diferentes. La radiación utilizada en el estudio se ha limitado a las longitudes de onda del visible, al considerar que en los lugares donde se exponen obras de arte, las IR están controladas y las UV han sido directamente eliminadas.

3.2. *Interacción Luz-Materia*

En este punto se detallan conceptos generales de la luz y su relación con los materiales. Al ser iluminados los objetos, con el tiempo se pueden apreciar a simple vista cambios de color y otro tipo de fenómenos relevantes en los mismos, estos efectos deben ser considerados, evitándolos o minimizándolos con acciones que se describen en la conservación preventiva.

3.2.1. *La interacción de la luz con los materiales.*

Aunque la materia está compuesta de átomos, desde el punto de vista subatómico, se podría decir que está prácticamente llena de espacio vacío. Mientras que, por ejemplo, el tamaño del átomo de hidrógeno es de 10^{-10} metros, su núcleo es 10^{-15} metros, es decir, cien mil veces menor. Por tanto, cuando las ondas electromagnéticas atraviesan un material, se mueven por un espacio vacío y tienen encuentros ocasionales con los núcleos atómicos o con algunos de sus electrones circundantes.

Cuanto más densamente empaquetados estén los átomos en un medio, es decir, más partículas subatómicas tenga el material (mayor número atómico Z), mayor será la probabilidad de que el fotón interaccione con el mismo. De la misma forma, al aumentar el espesor del elemento que debe atravesar el fotón, también aumenta la posibilidad de estos encuentros radiación-materia.

La absorción de la energía de la luz se debe a la interacción entre una molécula de un material y un fotón de la fuente de luz. Una molécula absorberá un fotón si la energía de éste es igual, o casi, a la diferencia entre dos estados de energía de la molécula. Cuando se absorbe un fotón, se dice que la molécula está en un estado electrónico excitado. En esta situación pueden suceder varios fenómenos asociados: la molécula puede reemitir la energía como *fluorescencia*; o puede *disiparse* en forma de calor; o se puede *transferir* a otra molécula; o la molécula puede *perder* parte de la energía, desde el estado excitado que posteriormente *reemite* el exceso de energía restante como *fosforescencia* o la disipa en forma de calor; o bien puede *romper un enlace* entre los átomos de la molécula excitada. Esta última circunstancia es la responsable de un cambio químico en la partícula (Figura 3.1) [96].

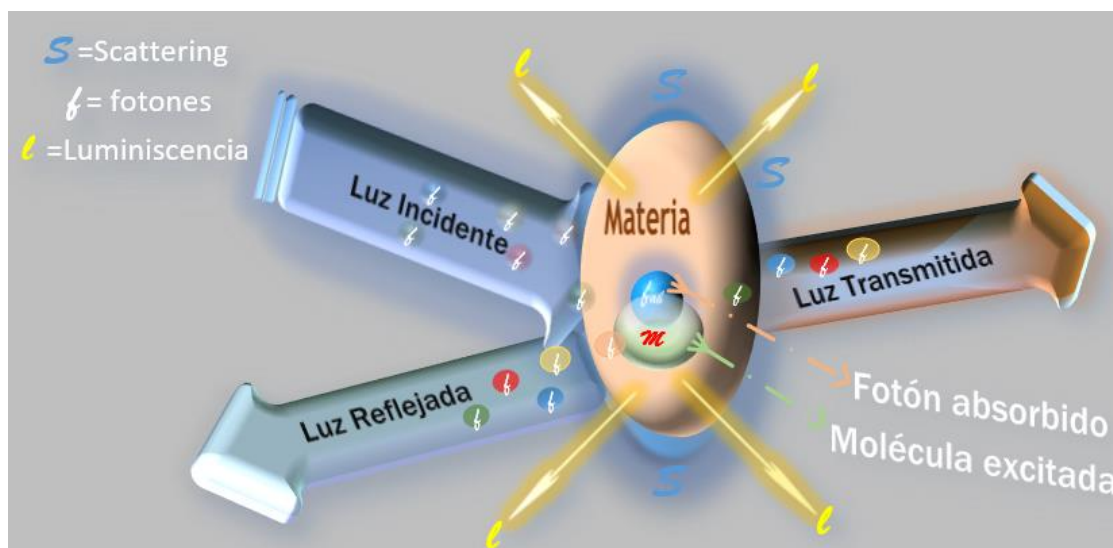


Figura 3.1 Esquema de las interacciones de la luz con la materia.

En el caso de la luz visible, por ejemplo, la reflexión y la transmisión de las ondas de luz ocurren debido a que éstas, al transferir energía a los electrones del material, provocan que éstos vibren. Si el elemento es transparente, las vibraciones de los electrones se transmiten a los átomos vecinos a través de la mayor parte del mismo y se reemiten en la dirección opuesta. Si el elemento es opaco, las vibraciones de los electrones no se transmiten de átomo a átomo, sino que más bien los electrones vibran durante periodos cortos de tiempo y luego son reemitidos como una onda de luz reflejada. La luz puede ser reemitida desde la superficie del material a una longitud de onda λ diferente, es decir, cambiando su color.

En cada interacción, la energía puede ser dirigida a una dirección diferente. Cuanto más energético es el fotón, menos cambios de dirección experimenta, y continúa viajando en la misma, penetrando

más en la materia. A medida que la radiación se mueve de un punto a otro de la materia, pierde su energía a través de varias interacciones con los átomos que se encuentra. Si la radiación tiene suficiente energía, puede ocasionalmente atravesar el objeto. La frecuencia o la longitud de una onda no ocasiona que ésta sea más o menos penetrante, se trata más bien de su nivel de interacción con la materia, o más específicamente, que la energía del fotón incidente sea la correcta para excitar cierto tipo de transiciones de una partícula cargada. Por ejemplo, las microondas penetran en el vidrio muy fácilmente, pero son muy fuertemente absorbidas por el agua; la radiación infrarroja es absorbida con intensidad tanto por el vidrio como por el agua, y sin embargo ambas sustancias transmiten la luz visible; y el ultravioleta es bloqueado por el vidrio, pero no tanto por el agua.

3.3. *El efecto fotoquímico*

Uno de los métodos más simples para que de un átomo se genere un radical libre, es descomponer una molécula apropiada irradiándola con luz de determinada longitud de onda. Cuando la molécula absorbe un fotón, pasa de su estado fundamental a un estado excitado que puede conducir a la escisión del átomo en radicales libres. Como el número de radicales libres producidos en un tiempo dado depende de

la intensidad de la luz absorbida, es muy sencillo controlar las condiciones de una reacción fotoquímica [97].

El efecto fotoquímico de la luz se observa en numerosas reacciones químicas que pueden ser; aceleradas, como la fotosíntesis de las plantas y la síntesis de vitamina D; o provocadas, como la fotoluminiscencia, el efecto fotográfico y el propio mecanismo de la visión [98-100].

3.3.1. Leyes básicas que describen el efecto fotoquímico

La Ley de Beer Lambert, con la que se puede calcular cuanta luz es absorbida por un material, mediante la expresión

$$A = \log(I_0/I_t) = \epsilon c_a l, \quad (3.1)$$

donde,

A es la absorbancia del material,

I_0 la intensidad del haz luminoso,

I_t la intensidad de la luz transmitida,

ϵ el coeficiente de extinción molar del material utilizado,

c la concentración de la especie absorbente, y

l la longitud recorrida por el haz a través del material.

Por tanto, la cantidad de energía absorbida (A) por el material depende de la concentración del reactivo que tenga el mismo (c),

del espesor del reactivo en el material (l), y del coeficiente de extinción molar del material (ϵ) ^[100].

La Ley de Grotthus-Draper (1818, 1843) o principio de activación fotoquímica expresa que solo la luz absorbida por una sustancia es capaz de producir un cambio fotoquímico; o lo que es lo mismo, que la activación fotoquímica es selectiva. Esta ley se cumple si la cantidad de energía del fotón absorbido es igual a la energía de activación de la molécula que lo absorbe ^[89].

La Ley de Stark-Einstein en 1905, segunda ley o principio de la activación cuántica ^[100] indica que, si aplicamos la teoría cuántica a la acción fotoquímica, con el fin de conocer la energía necesaria para activar una molécula, cada cuanto de luz absorbido produce la activación de una molécula con una energía equivalente a la del cuanto. Así, 1 Einstein^2 de energía activa, produce 1 mol de cuantos en un material que absorbe fotones, cuya expresión es,

$$E = N_A h(p) c / \lambda, \quad (3.2)$$

donde N_A es la constante de Avogadro ($6,023 \times 10^{23}$). La ecuación permite calcular la energía necesaria para activar 1 mol dependiendo de la longitud de onda λ de la fuente de luz. Al valor energético

² Einstein: unidad utilizada principalmente en Química.

necesario para romper un enlace determinado con una fuente monocromática, cuya energía debe ser mayor que la energía del enlace se denomina “equivalente fotoquímico”. El resultado obtenido será el número de moles que se activan en el material por cada kJ absorbido.

3.3.2. Rendimiento cuántico

Cada molécula que interviene en una reacción fotoquímica absorbe un cuanto de luz, y su rendimiento cuántico ($r.c.$) es,

$$r.c. = \frac{n^{\circ} \text{ de mol de reactivo destruido por unidad de tiempo}}{n^{\circ} \text{ de Einsteins absorbidos por unidad de tiempo}} . \quad (3.3)$$

El $r.c.$ de las reacciones fotoquímicas es bajo. Es decir, la probabilidad de que ocurran cambios químicos es pequeña en comparación con otros fenómenos.

De cada millón de moléculas que absorben un fotón, sólo cien de ellas cambian químicamente (el resto de las moléculas excitadas disipan la energía extra en diferentes formas como calor, fluorescencia, etc.). En estos casos el $r.c.$ de la reacción fotoquímica será del 0,01%.

3.3.3. Procesos químicos entre el fotón y los materiales

En las reacciones químicas en las que intervienen una molécula y un fotón tienen lugar dos tipos de procesos (Figura 3.2):

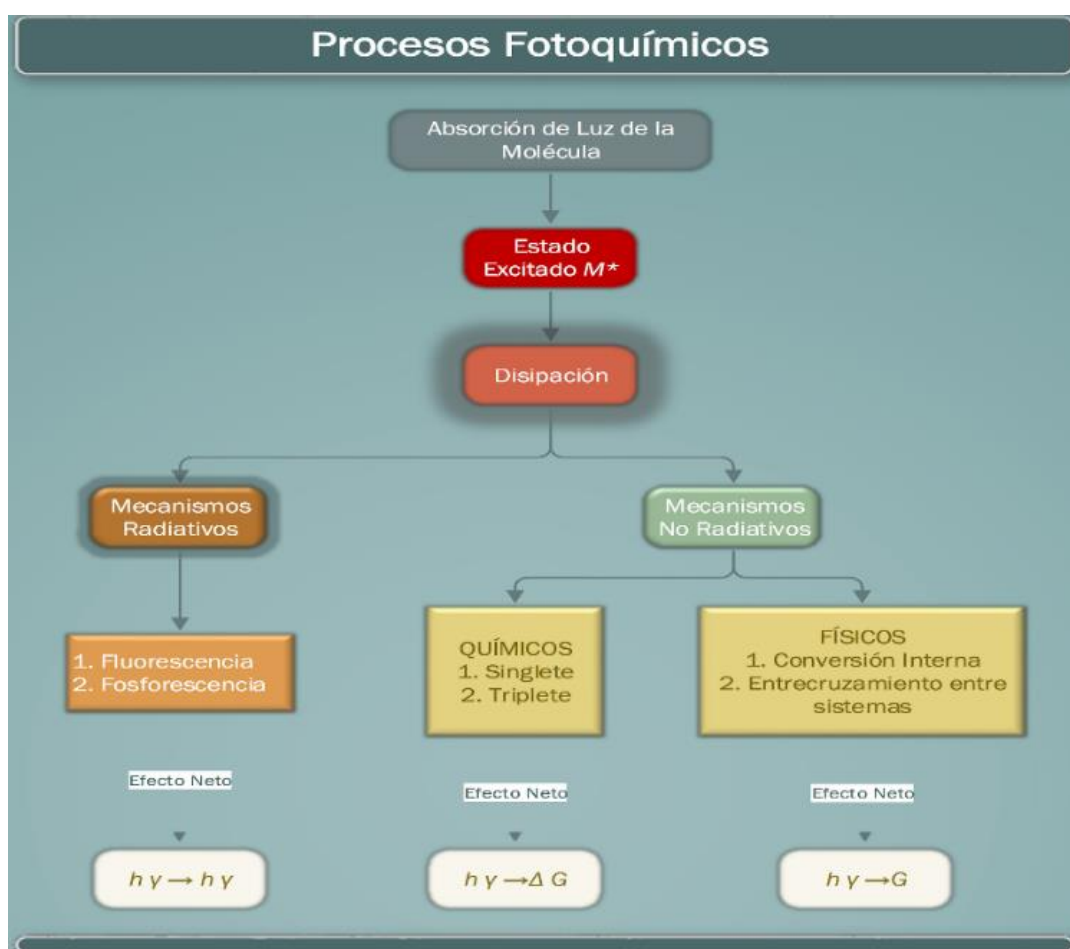


Figura 3.2 Esquema general de los procesos fotoquímicos.

- i. Un proceso *primario*, con dos fases: *excitación* y *desactivación*:

La *excitación* se produce cuando la molécula M absorbe un fotón y ésta pasa a un estado electrónico excitado M^*



La *desactivación* se produce cuando la molécula excitada M^* pierde su exceso de energía y/o vuelve al estado fundamental, esto es, un efecto foto-físico. O bien se produce una reacción química, con un efecto fotoquímico.

- ii. Un proceso *secundario*, en el que las moléculas excitadas en el proceso anterior pueden reaccionar entre sí o con otra molécula del entorno.

En general, y aplicando estos procesos a la conservación preventiva, para establecer si la luz que incide sobre un objeto de arte provocará un cambio significativo en el mismo, se debe determinar primero si absorbe la energía de la fuente utilizada y segundo, que rendimiento cuántico tiene la reacción fotoquímica posterior.

La primera información se comprueba comparando el espectro de emisión de la fuente de luz con el espectro de absorción del objeto; si ambos son compatibles la energía puede ser absorbida.

La segunda información se deduce de los resultados de experimentos fotoquímicos cuantitativos, midiendo la radiación transmitida con y sin el objeto, con una célula fotoeléctrica o un actinómetro químico.

Cuando el estudio del efecto fotoquímico se realiza sobre las obras del patrimonio cultural y se analizan cómo influyen espectralmente la cantidad y el tipo de radiación óptica según la clase de materiales utilizados en las obras de arte, se debe considerar principalmente la influencia de cuatro factores ^[79,101]:

- a) El nivel de irradiancia de la fuente de iluminación.

- b) El tiempo de exposición a la radiación.
- c) La distribución espectral de la radiación de la fuente con la que se esté iluminando.
- d) La respuesta espectral del material utilizado en las obras de arte.

Para entender la importancia de la realización de investigaciones sobre el envejecimiento (daño) de los materiales debido al efecto fotoquímico, es necesario el estudio de los cuatro factores enumerados y de cómo influyen en el patrimonio; y una revisión profunda de las investigaciones realizadas, que sirva para conocer la evolución de las medidas tomadas con el fin de proteger o aminorar sus consecuencias en las obras de arte expuestas.

En la investigación desarrollada en este capítulo se han tenido en cuenta los cuatro factores indicados y su relación con el daño que producen en los materiales utilizados.

3.4. *Nivel de irradiancia. Tiempo de exposición*

El “*nivel de irradiancia*”, tiene una relación directamente proporcional al daño que produce la luz en los materiales expuestos, siendo necesario limitarla para provocar el menor deterioro posible.

Se define la irradiancia ($E_{e\lambda}$) como el flujo radiante que incide en una superficie por unidad de área en cada longitud de onda. Se utiliza para describir la potencia incidente en W , por unidad de superficie en m^2 ,

para cualquier tipo de radiación electromagnética, y su longitud de onda expresada en *nm*.

El “*tiempo de exposición*” es un factor que, al igual que el nivel de irradiancia, es directamente proporcional al daño.

Los dos aspectos descritos, nivel de irradiancia y tiempo de exposición, están relacionados por la ley de reciprocidad o ley de Bunsen-Roscoe, que se expresa como,

$$H = \int_t E_e dt, \quad (3.5)$$

donde

H es la integración de la irradiancia y el tiempo (Whm^{-2})

E_e la irradiancia incidente en la superficie (Wm^{-2}), y

t el tiempo en horas (h)

H representa, por tanto, la exposición total o la cantidad de luz recibida por una superficie, en Whm^{-2} . Por ejemplo, un objeto recibe la misma radiación si se expone a $20 Wm^{-2}$ durante 100 horas, que si es irradiado a $100 Wm^{-2}$ durante 20 horas, siempre que la fuente sea de las mismas características espectrales. En los museos, para referirse a la exposición total se utiliza como unidad práctica el *Mlux h*.

Del Hoyo-Meléndez en 2011 ^[102], en un artículo posterior sobre la ley de reciprocidad, determina que este proceso no es lineal como lo habían estimado Bunsen-Roscoe. Los resultados indican que la

reciprocidad se cumple en los colorantes más estables, mientras que los materiales con menor estabilidad a la luz pueden experimentar desviaciones que son proporcionales a la intensidad de la iluminación. El estudio confirma que la variación en la ley de reciprocidad se asocia con el uso de lámparas de alta intensidad durante ensayos de envejecimiento acelerado. Este análisis es importante, ya que cuando se realizan procesos de envejecimiento se tienden a acelerar con niveles de iluminancia elevados. Además, se comprobó que la ley de Bunsen-Roscoe se cumple en el caso de que se utilicen niveles de iluminancia de baja intensidad (valores de iluminancia por debajo de 1 *Megalux*).

3.4.1. Niveles de Irradiancia y Tiempo de Exposición: su relación con la conservación preventiva

Un estudio en profundidad de estos dos factores sirve para conocer la evolución de los sistemas de iluminación en museos y la radiación recomendada para producir el menor daño posible.

Conviene precisar que, en la praxis de los museos, para referirse a la radiación recibida por una obra de arte, no suelen utilizar los términos irradiancia o Wm^{-2} (unidades de radiometría), es más común el uso de valores y unidades fotométricas. El motivo es doble: por un lado, tratan de expresar la sensación luminosa para el observador; y por otro, hay que tener en cuenta que los costes de

los aparatos de medida fotométricos suelen ser mucho más asequibles que el de los radiométricos.

Es por este hecho que, en la mayor parte de las referencias bibliográficas, aparece como unidad el *lux* para indicar la cantidad de radiación necesaria para iluminar el material expuesto, y no el nivel de irradiancia. Por ello, hay que entender que en las siguientes reseñas cuando se refieren a iluminancia, se está considerando un factor que puede producir daño, que en la CIE ^[79] se nombra como “*nivel de irradiancia*”.

Así mismo, los valores de iluminancia sugeridos en las referencias que se van a citar, están considerando el “*tiempo de exposición*”. Las recomendaciones de iluminancia media están pensadas según el número de horas anuales que las exposiciones de obras de arte permanecen abiertas al público. Por tanto, la cantidad de radiación a la que están expuestas es un cómputo medio anual. Este valor suele considerarse de 10 *horas* diarias por 365 *días* del año y por el valor medio de radiación en *lux* que proponga la recomendación (*lux año*).

Como primer referente en la conservación del patrimonio podemos citar a Thomson, que en sus estudios de 1961 ^[85] y en una revisión posterior de 1986 ^[21], habla de niveles de iluminancia propuestos en los espacios donde se exponga:

"Las recomendaciones 150/50 lux... no se basan en fórmulas numéricas, pero son un intento de equilibrar la necesidad de una buena visión en contra de la necesidad de una buena conservación. Por lo tanto, estos niveles pueden ser impugnados tan pronto como nueva información se presente en relación con (a) la relación entre los niveles de luz y visión, y (b) las tasas de daño por la luz en los museos"

"...50 lux es una iluminación satisfactoria, incluso en pequeños objetos con bajo contraste."

Thomson entiende que 50 *lux* serían suficientes para las áreas donde se expongan obras de arte que tengan materiales sensibles, y se basa en la experiencia de mínimos indicados, de 50 a 70 *lux*, por estudios japoneses en 1930, y estudios franceses en 1934, que recomiendan como valor medio 75 *lux* ^[103]. En el caso de objetos con menos sensibilidad a la radiación visible, Thomson ^[85] aconseja 150 *lux*.

Estos valores, 50 *lux* para objetos sensibles y para los menos 150 *lux*, se sostienen en estudios posteriores, donde se especifica el comportamiento del sistema visual humano según el nivel de iluminancia utilizado, que determinan que es sensible a niveles bajos. Así, Crawford en 1973 ^[104] publica que el límite en el que el

sistema ocular pierde su capacidad para ver pequeñas diferencias de color está próximo a 2 *lux*, y determina que se pueden distinguir colores de forma correcta con valores entre 10 y 20 *lux* (Figura 3.3). Boyce en 1987 ^[105] establece en 10 *lux* el umbral de iluminancia donde se pueden discriminar los colores. Ambos estudios sirven para justificar el uso de niveles bajos de iluminancia en galerías y exposiciones. Boyce insiste en 50 *lux* como un valor suficiente para ver objetos y pinturas claras, y un valor de 150 *lux* como óptimos para ver objetos oscuros, e incluye un nuevo factor a considerar como es la edad del observador. Entiende que personas mayores de 50 años necesitarían más iluminancia, sin establecer un valor recomendado. En el mismo año Loe ^[106] describe datos obtenidos en la medición de la satisfacción del espectador con respecto a la iluminación en una galería. En el ajuste de los valores se obtiene una curva suave, donde el valor óptimo se acerca a 200 *lux*, teniendo en cuenta que los participantes en el estudio siguen viendo correctamente en 50 *lux*. Los datos obtenidos por Loe sirven a Thomson ^[21] para modificar, su recomendación anterior para objetos menos delicados, de los 150 *lux* a 200 *lux*.

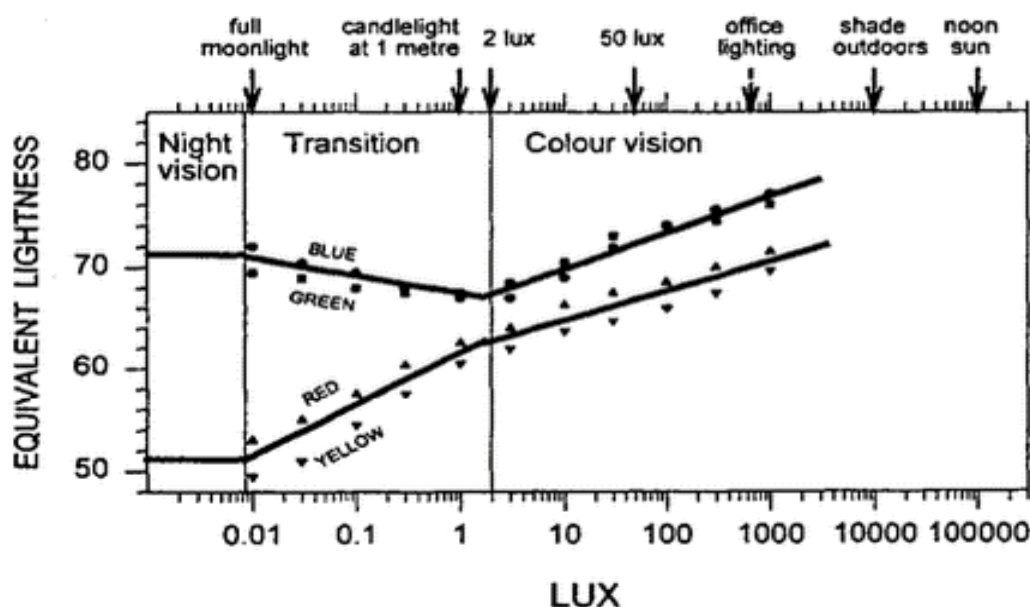


Figura 3.3 Comportamiento del sistema visual humano a diferentes iluminancias [104].

En los estudios citados, se demostraba que 50 *lux* es un valor óptimo de iluminación y de percepción de los colores para cubrir las necesidades del observador, y finalmente se acepta que esta cantidad sea un mínimo indispensable para la comodidad del espectador. La utilización de 50 *lux* como un nivel estándar de iluminancia en galerías, hizo que los expertos en arte manifestaran su insatisfacción, al entender que no era el mejor nivel por tener un rendimiento del color muy pobre, una discusión que siempre se mantiene entre conservación y exposición.

En los años 80 IESNA [107], sociedad referente en sistemas de alumbrado, entiende que los valores adecuados de iluminación se establezcan según la demanda visual del observador, y proporciona unos valores aproximados según las tareas que se vayan a desarrollar. Estas recomendaciones indican que se usen entre 50 – 100 *lux* para orientación en edificios, en visitas cortas en museos y para iluminar materiales

delicados; entre 500 – 1000 *lux* para tareas visuales que requieran contraste medio o ver objetos de tamaño pequeño; y entre 10000 – 20000 *lux* para tareas con necesidad de muy bajo contraste y además si son objetos de pequeño tamaño. En 1996, IESNA edita la guía, “*Museum and Art Gallery Lighting: A Recommended Practice*” [95], donde no aparece la recomendación de 50 *lux* para materiales delicados, y la discusión la centran en que “...la iluminación tiene que ser suficiente para que los objetos sean visibles para los visitantes...”, sin dar un valor mínimo concreto.

En 1981, la CIE [108] publica resultados sobre el rendimiento visual. En esta norma se comprueba la precisión con la que los observadores ven los detalles de los objetos en una exposición con diferentes niveles de iluminancia. Los ajustes para la visibilidad los realizaron, dependiendo del objeto y del tipo de observación necesaria para cada elemento. El nivel de partida es de 50 *lux* como umbral mínimo para una visualización normal. Si el objeto tiene detalles de bajo contraste, la iluminancia tiene que elevarse 3 veces sobre el umbral, $50 \times 3 = 150 \text{ lux}$. Si además se quieren percibir superficies oscuras, se elevaría tres veces más, $150 \times 3 = 450 \text{ lux}$. Por otra parte, si el espectador es de avanzada edad, aumenta 3 veces más, $450 \times 3 = 1350 \text{ lux}$. Si se quiere distinguir un objeto con mayor precisión, donde además el tiempo es limitado para realizar un examen completo, entonces la recomendación es aumentar 3 veces más, $1350 \times 3 = 4050 \text{ lux}$ [90].

Ante la falta de consenso, y con el fin de conservar sus exposiciones, las galerías han incorporado sistemas de iluminación que siguen una variada gama de recomendaciones. Como ejemplos de estas prácticas, la Galería *Tate* implanta en 1987 un sistema que controla automáticamente el nivel de iluminancia de la sala con un máximo estimado en 150 *lux*. En la Galería *Cloe* se instala un sistema informatizado para que la sala sólo estuviera iluminada cuando fuera necesario, estableciendo el máximo en 200 *lux*. De esta forma se evita que la exposición esté iluminada si no hay nadie en la sala, disminuyendo este valor en el tiempo ($\downarrow \text{lux año}$).

En la norma CIE 89/1991 ^[101] se publica información sobre los niveles de irradiancia recomendados en los museos, en este caso, la dependencia es del material en el que se ha realizado la obra de arte, en lugar de considerar si los observadores ven bien los objetos expuestos. Justifica el uso de valores de irradiancia en lugar de valores de iluminancia para determinar de forma correcta el daño que produce la radiación, e indica que es necesario conocer las características espectrales de la fuente de iluminación usada. Establece unos valores patrón dependiendo del componente utilizado, relacionados con la cantidad de radiación que modificaría el color del material en una unidad dentro de la escala *CIELAB*. Como ejemplo, para una pintura realizada en acuarela el valor se establece en 175 Whm^{-2} , para óleo 850 Whm^{-2} , para papel de periódico 5 Whm^{-2} y para textiles 290 Whm^{-2} . En los casos expuestos en la norma, la fuente de luz utilizada es una lámpara de Xenón con filtros para

diferentes longitudes de onda. Como conclusión, el informe establece que los conservadores deben enfrentarse con el hecho de que los objetos sensibles a la luz tienen una vida útil de visualización limitada y se debe evitar la exposición a una irradiación innecesaria en este tipo de materiales. La combinación de tareas diseñadas para asegurar la mayor viabilidad posible del uso de las colecciones de arte, conforman lo que se ha llamado procesos de gestión de riesgos, que fueron desarrollados por Michalski en 1992 [27].

Cuttle en 1995 [86], dice que las nuevas tecnologías de control ofrecen interesantes opciones para efectuar estrategias de limitación de daños debidos a la exposición a la luz, y postula que, *"... No hay ningún nivel seguro de exposición a la luz de un objeto sensible a la misma."*

Propone medidas para mejorar la exposición sin aumentar la radiación, como que los espectadores estén adaptados a niveles bajos de luminosidad, que la envolvente visual al objeto no proporcione ninguna distracción o competencia visual, que la iluminación sea suficientemente satisfactoria para revelar la forma, el color, la textura y el detalle de la obra, que la duración a la exposición lumínica sea el mínimo necesario, etc.

Como referencia final, Michalski en 1997 [90] sugiere

"...Un ajuste entre irradiancia y el número de horas de exposición, limitando a unos valores máximos según la respuesta espectral de los materiales utilizados".

En la Tabla 3.1 se muestran los niveles de iluminancia actualmente recomendados por las diferentes instituciones de referencia. Estos niveles están basados en un sistema de escala de sensibilidad de los materiales utilizados, ISO Blue Wool ^[109].

Tabla 3.1 Valores recomendados en *klux hora año*, según la sensibilidad de la obra expuesta ^[109]

Organización	Sensibilidad baja (klx h/y)	Sensibilidad media (klx h/y)	Sensibilidad alta (klx h/y)
<i>Illuminating Engineering Society of North America</i>	Variable	480	50
<i>Heritage Collections Council, Australia</i>	-	507-650	127-200
<i>Canadian Conservation Institute</i>	-	1000(ISO4)	100(ISO2)
<i>Commission Internationale de l'Éclairage (CIE)</i>	600	150	15

El tercer factor a tener en cuenta, cuando se estudia el efecto fotoquímico, es la distribución de energía espectral de la fuente de luz utilizada.

Como se ha descrito, la energía de la radiación electromagnética depende de la potencia de la fuente y de la longitud de onda. Por ello, es necesario conocer la distribución espectral de la fuente que ilumina las obras del patrimonio cultural, ya que el daño que puede producir en ellas tiene una relación inversamente proporcional a la longitud de onda.

3.5. *Respuesta espectral del material utilizado en obras del patrimonio cultural*

Como se ha descrito en el apartado 3.2., cuando la luz incide en los materiales expuestos, se produce una reacción fotoquímica en las moléculas sensibles a la luz, con una absorción de fotones por parte de éstas que provoca cambios que no son deseables en el caso del patrimonio. El valor energético que produce la reacción fotoquímica en el visible coincide con la energía necesaria para el funcionamiento de nuestra retina, por ello hay que considerar que cualquier sistema de iluminación utilizado en el patrimonio cultural que permita la visualización a un ser humano, va a producir daño ^[71].

Cada material muestra diferente sensibilidad a la radiación visible. La respuesta de las obras expuestas a esta radiación depende de la reflectancia y por tanto de su absorbancia. Esta última característica diferenciará a los objetos, desde los muy sensibles a los que apenas les afecta esta radiación. Esta sensibilidad determinará la “*cantidad de irradiancia*”, el “*tiempo de exposición*” y la “*distribución espectral de la fuente*”, que, en cierto modo, son elementos controlables en el sistema de iluminación de una exposición. Pero “*la respuesta espectral del material expuesto a la radiación*”, es un factor muy complejo de controlar, al depender de múltiples variables de las obras expuestas como:

- i. la diversidad de los elementos utilizados,

- ii. el mayor o menor deterioro,
- iii. la edad de las mismas, al suponer esto una mayor o menor sensibilidad a la radiación,
- iv. el motivo para el que fueron creadas, que genera la necesidad de usar un tipo de iluminación adaptado a la misma,
- v. los colores de los objetos expuestos, que hacen que las características lumínicas de la fuente puedan modificar el contraste,
- vi. las diferentes sensibilidades de los materiales que están compuestas las obras de la exposición, provocarán que se dañen más los elementos que tienen una mayor respuesta a la luz, etc.

Estos motivos, tan diversos, hacen difícilmente predecible el comportamiento de todos los elementos que se van a iluminar en una exposición. Las medidas que se han de tomar también van a ser diversas, y deben ser compatibles entre sí para asegurar el mínimo daño. Resolver estas circunstancias es el motivo de múltiples estudios. A continuación, se realiza una revisión que proponen estrategias sobre conservación preventiva de los materiales cuando están expuestos a una radiación visible.

Russell et al. en 1888 ^[110], realizaron la que puede ser considerada la primera referencia en esta línea de investigación, observaron que el uso de distintas fuentes de iluminación afecta de forma diferente a la

pérdida de color de los pigmentos de los cuadros. El primer ensayo con resultados que tuvo repercusión en la conservación, fue realizado por Harrison en 1953 ^[111]. El material que utilizó en su estudio fue un papel de baja calidad, como el usado en los periódicos, y lo iluminó con una fuente que tenía longitudes de onda desde 300 nm del UV, hasta una radiación visible de 540 nm, y midió la decoloración que se producía en el papel. Con los resultados obtenidos, propuso una función del daño $D(\lambda)$ (Figura 3.4) que describe la relación entre la longitud de onda de la fuente y la pérdida de color en los objetos expuestos, y en ella introduce el concepto de *respuesta espectral del material iluminado*, y la denomina “*responsividad del material*” a la luz $S(\lambda)$. En su estudio, incluyó el concepto “*índice de daño*”, DI , cómo

$$DI = \frac{F_{dm,rel}}{F_{v,rel}}, \quad (3.6)$$

siendo $F_{dm,rel}$ el flujo del daño relativo, cuya expresión es-

$$F_{dm,rel} = \int_{\lambda} \phi_r(\lambda) T(\lambda) D(\lambda) d\lambda, \quad (3.7)$$

y $F_{v,rel}$ es el flujo luminoso relativo, cuya expresión es,

$$F_{v,rel} = k \int_{\lambda} \phi_l(\lambda) T(\lambda) V(\lambda) d\lambda, \quad (3.8)$$

donde $F_{dm,rel}$ y $F_{v,rel}$ están en $W h m^{-2}$, y

$\phi_r(\lambda)$ es el flujo radiante efectivo, en $W m^{-2} nm^{-1}$.

$\phi_l(\lambda)$ el flujo luminoso efectivo, en *lm*.

$T(\lambda)$ la transmitancia espectral.

$D(\lambda)$ la función del daño.

$V(\lambda)$ la eficiencia espectral luminosa para la visión fotópica.

k la relación entre flujo radiante y flujo luminoso y depende de la longitud de onda, $k_{maxima} = 683 \text{ lm W}^{-1}$ para $\lambda = 555 \text{ nm}$, y

λ la longitud de onda, en *nm*.

Esta teoría, que despertó interés en los responsables de museos y exposiciones, fue revisada por Thomson [21], p.178], quien comprobó que Harrison [111] para obtener el valor $D(\lambda)$ no había utilizado una muestra suficiente de materiales, y que la función se comportaba de forma distinta dependiendo del material utilizado. Esto hizo que la teoría no tuviera repercusión hasta años posteriores.

Así, a través de los años 50, 60 y 70 aparecieron artículos sobre el valor $D(\lambda)$, pero ninguno de ellos propuso recomendaciones al mundo de los museos. Una de las razones fue que Thomson, el autor más influyente, no creía que los datos obtenidos en pruebas con 30.000 – 100.000 *lux* se pudieran utilizar para predecir lo que sucedería en el comportamiento de los materiales con niveles más bajos de iluminación, “...Ensayos acelerados, por lo general, distorsionan los resultados más allá de su utilidad” [85].

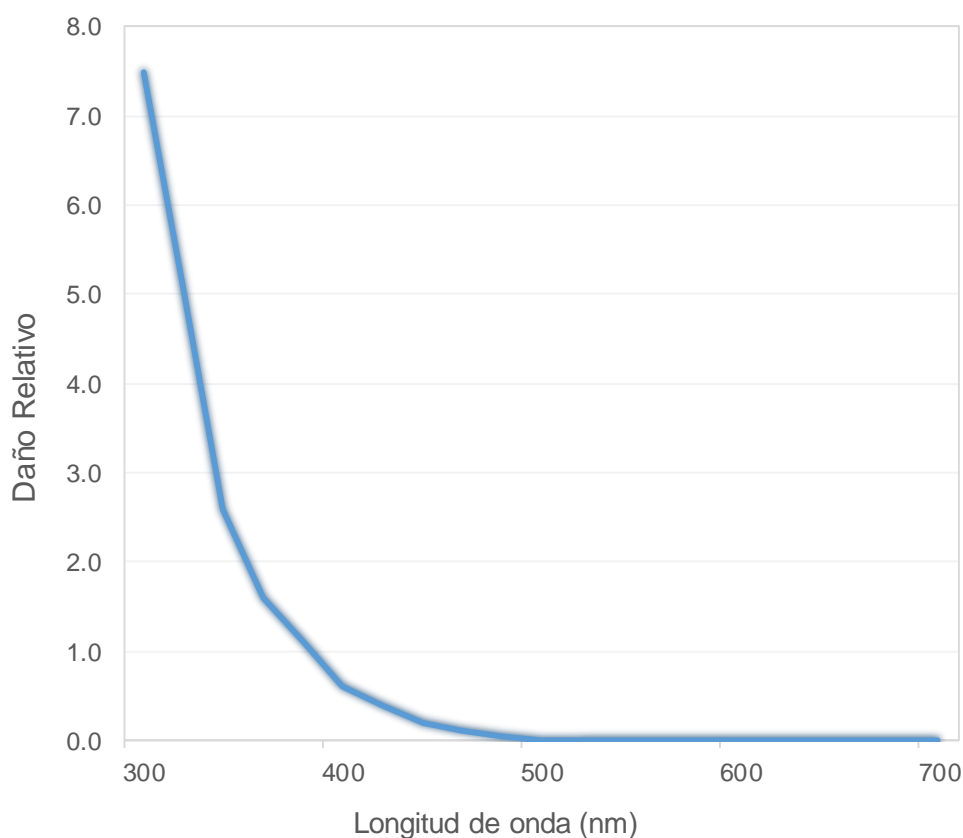


Figura 3.4 Representación gráfica de la Función de daño de Harrison.^[79]

Esto se verificó al comprobarse que en los ensayos acelerados no se había controlado la temperatura, y por ello se obtuvieron resultados muy dispares en la función de daño propuesta por Harrison ^[111].

Aydinli et al. ^[70] en 1983 examinaron el comportamiento de diversos materiales que se encuentran en objetos de museos, como papel, pigmentos al óleo, acuarela y textiles, y comprobaron que se cumple el concepto general que proponía Harrison, donde la función de daño $D(\lambda)$ disminuye según aumenta la longitud de onda. Pero el comportamiento de cada material investigado es distinto, como manifestó Thomson. Estos estudios ratifican que la radiación *UV* es la

más perjudicial, y que la función de daño $D(\lambda)$ disminuye en el visible, de forma exponencial a medida que la fuente se aproxima a longitudes de onda cercanas al rojo. La investigación de Aydinli et al. está limitada en el visible, porque sólo utilizaron iluminantes que emitían en tres longitudes de onda de radiación visible, y se centró más en la radiación *UV*, con cinco emisiones diferentes.

Kenjo en 1986 ^[112,113] llevó a cabo dos estudios más detallados sobre el efecto de la radiación en la decoloración de los materiales. Iluminó las muestras con radiación visible de siete longitudes de onda desde 390 a 700 *nm* con distintas fuentes luminosas. Las muestras utilizadas eran seis pigmentos diferentes envejecidos de forma natural durante veinticinco y cincuenta años. De ellas, se mostró más sensible la alizarina (pigmento rojo, purpurina), que perdía color en todas las longitudes de onda; otras como el litargirio (óxido de plomo) y el cártamo (amarillo planta natural) se oscurecieron con la exposición a la luz. Según sus estudios, se produjo un cambio de color que es diez veces mayor en las fuentes de luz con $\lambda = 390 \text{ nm}$ que en las fuentes con $\lambda = 700 \text{ nm}$.

Saunders en 1994 ^[71] realiza una nueva investigación en la misma línea que Kenjo, pero con otros materiales. La fuente utilizada en este caso fue el iluminante D65, y mediante filtros colocados delante de la fuente irradió las muestras con luz de siete longitudes de onda

diferentes. La transmitancia máxima de cada filtro estaba separada por 50 nm , y las longitudes de onda utilizadas iban desde 400 nm hasta 700 nm . De su estudio elimina el UV, según indica, porque en los museos ya se había tomado la decisión de suprimir o limitar las radiaciones con longitudes de onda $\lambda < 400\text{ nm}$. Unas muestras las radió solo con luz blanca, y otras con luz en las siete longitudes de onda. Las expuestas a la luz blanca se decoloraron más rápidamente que las expuestas a la luz con filtros. El autor realizó una interpolación de los datos medidos, con un ajuste hasta un valor radiación de 25000 W h m^{-2} (Figura 3.5). Este valor es el equivalente a radiar con una lámpara de 50 lux ocho horas al día durante cuarenta años. En su estudio se confirma que el comportamiento de cada tipo de material depende de la longitud de onda de la radiación, causando más daño las de longitud de onda λ más cortas, y a medida que la longitud de onda de la radiación aumenta, la responsividad del material $S(\lambda)$ disminuye. En el experimento, encontró que las muestras con pigmentos azules no seguían esta norma, teniendo un valle de mínima responsividad $S(\lambda)$ entre $440 - 480\text{ nm}$. La causa de este comportamiento es debido, según Saunders, a que la máxima reflectancia de estas muestras está en el entorno de 450 nm , por lo que tendrá una menor absorbancia en esa zona y por tanto una menor responsividad $S(\lambda)$. Basándose en los resultados obtenidos, y con el fin de evitar radiación innecesaria, propone a museos y exposiciones colocar filtros amarillos entre los

objetos expuestos y las fuentes de iluminación para eliminar la radiación azul, o en su defecto usar fuentes de luz que emitan principalmente en la zona espectral del rojo, y estima que este tipo de iluminante es el más recomendable para cualquier exposición.

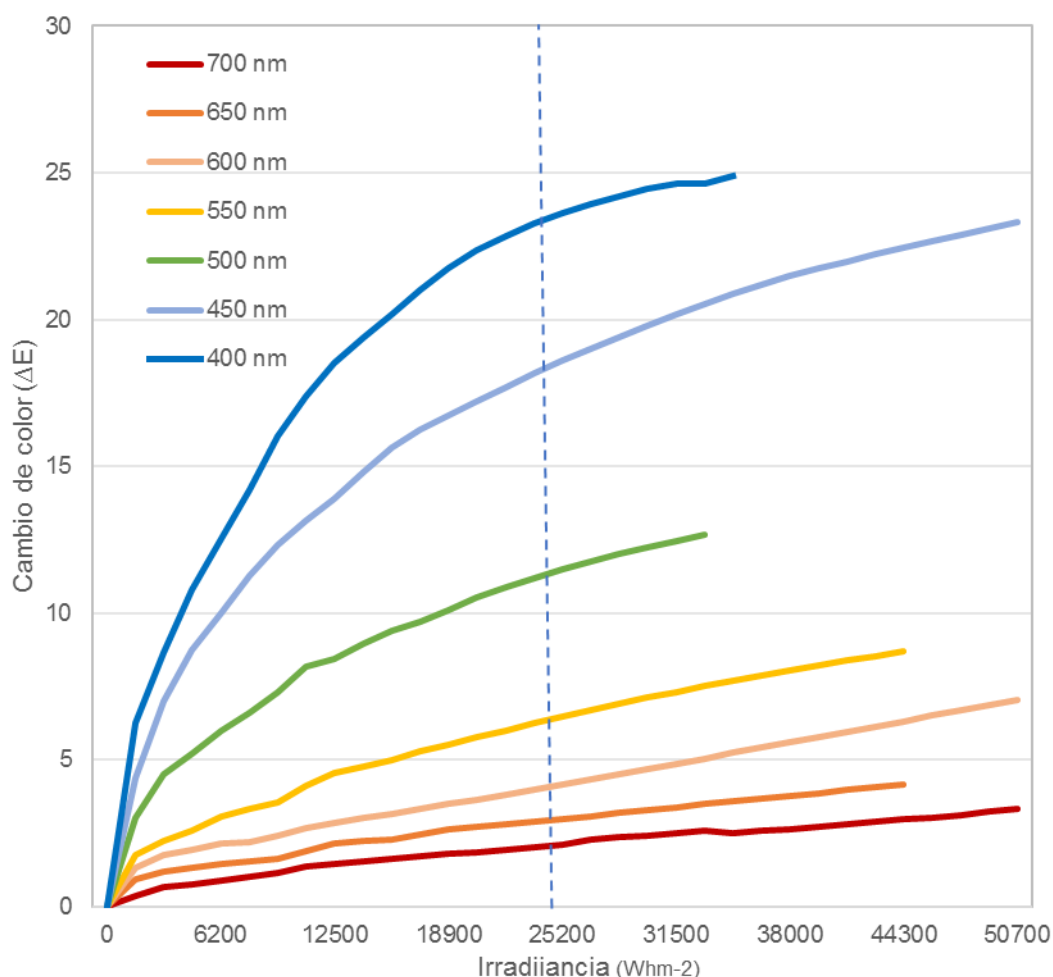


Figura 3.5 Interpolación de la relación entre la energía radiada y la decoloración de las muestras, con un ajuste hasta 25000 Wh m^{-2} . Relación de longitudes de onda según la transmitancia de los filtros utilizados por Saunders [71].

En el año 2004 la CIE [79] publica una guía general sobre el control de daño en los materiales de los museos, en ella se recogen los últimos estudios hasta ese momento.

En la norma, se incluyen cuatro métodos diferentes para medir el daño que resultan útiles para conocer el efecto de la radiación sobre las obras expuestas.

3.6. *Medida del Daño según la norma CIE 157-2004*

Generar herramientas con las que se pueda medir el daño que han sufrido las obras expuestas a la radiación, es imprescindible para comprobar la sensibilidad de los materiales a la radiación.

En esta sección se estudian los cuatro métodos propuestos por la norma CIE ^[79] para medir el daño:

- La escala Blue Wool.
- El sistema *CIELAB*.
- Cálculo del Umbral de la exposición radiante efectiva (modelo Berlín).
- La respuesta de los colorantes a la exposición.

3.7. *Escala Blue Wool*

La ISO Blue Wool, son ocho escalas desarrolladas por la industria del tinte en la primera parte del siglo XX, para medir la sensibilidad a la luz de los colorantes conocidos ^[114]. En estas pruebas se incluyeron los colorantes naturales. Para realizar la escala, se colocó un patrón con ocho muestras de lana teñida en una cabina, con la humedad y la temperatura controladas, que se expusieron a una fuente de luz de

amplio espectro, y se compararon con el mismo patrón que no había sido expuesto a la radiación. De forma visual se fue comprobando cuanto había variado el color de las muestras radiadas con respecto a las no radiadas, valorando la sensibilidad de cada pigmento desde 1 (más sensible) hasta el 8 (menos sensible) que se corresponderían a la ISO 1 y la ISO 8, respectivamente.

Recientemente, fueron incorporadas en la CIE 157 ^[79] las categorías de alta, media o baja sensibilidad, utilizando los estándares ISO de Blue Wool, que se aplican a los materiales expuestos en museos. Las ocho escalas se agrupan en alta sensibilidad para ISO 1, 2 o 3, media para ISO 4, 5 o 6 y baja para 7, 8 o valores mayores que han sido añadidos por requisitos de la industria textil. En la Figura 3.6 se muestra un ejemplo de la valoración de los materiales con la norma ISO Blue Wool, según la cantidad de radiación recibida ^[115]. Con esta norma ISO se puede realizar un análisis inicial del daño en el rango de ISO 1 a ISO 8, que sirve como estimación de la gama de sensibilidades en una colección mixta.

Saunders ^[71] cuestiona este método como poco fiable para valorar el daño que produce una fuente de luz, y cree que sería más apropiado utilizar dosímetros como sugieren Kenjo, Tennent y Smith ^[113,116,117].

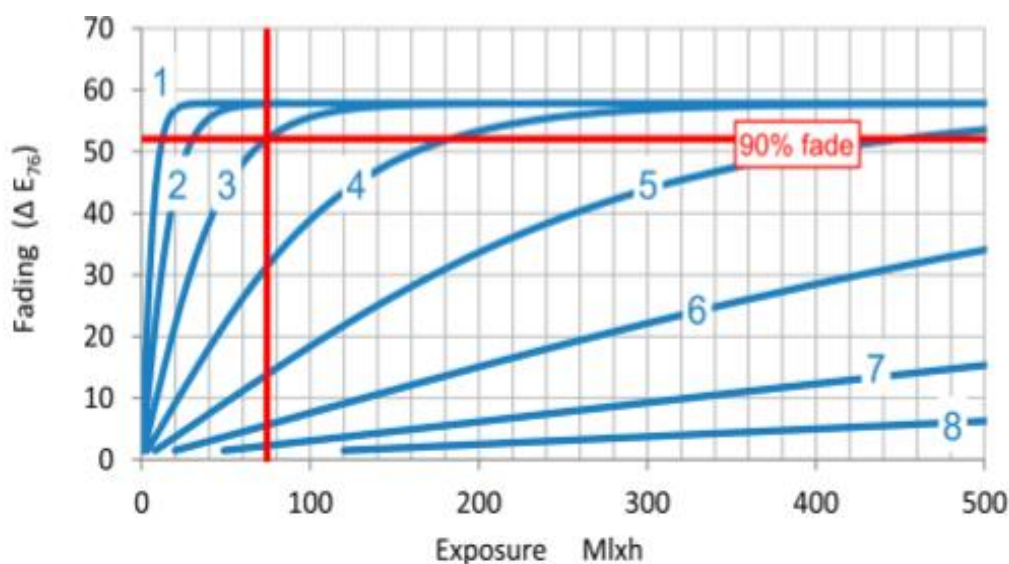


Figura 3.6 Pérdida de color para materiales coloreados medidos en términos de la ISO Blue Wool 1 a 8. Michalski ^[115]

3.8. El sistema CIELAB

Este método se basa en el sistema *CIELAB* 1976 ^[56,118,119], que define las características de color de un material mediante tres coordenadas, $(L^* a^* b^*)$. L^* determina la luminosidad del material. a^* y b^* proporcionan las coordenadas cromáticas del mismo material (Figura 3.7).

En este sistema, el daño producido en un objeto expuesto a una radiación, se mide con la diferencia de color ΔE_{ab}^* . La forma operativa es medir los tres vectores del sistema antes de irradiar un objeto (L_0^*, a_0^*, b_0^*) , realizar una nueva medida después de irradiado, obteniendo nuevos valores (L_1^*, a_1^*, b_1^*) , el resultado es la diferencia de color ΔE_{ab}^* , entre la primera y segunda medida de la siguiente forma,

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_1^* - L_0^*)^2 + (a_1^* - a_0^*)^2 + (b_1^* - b_0^*)^2}. \quad (3.9)$$

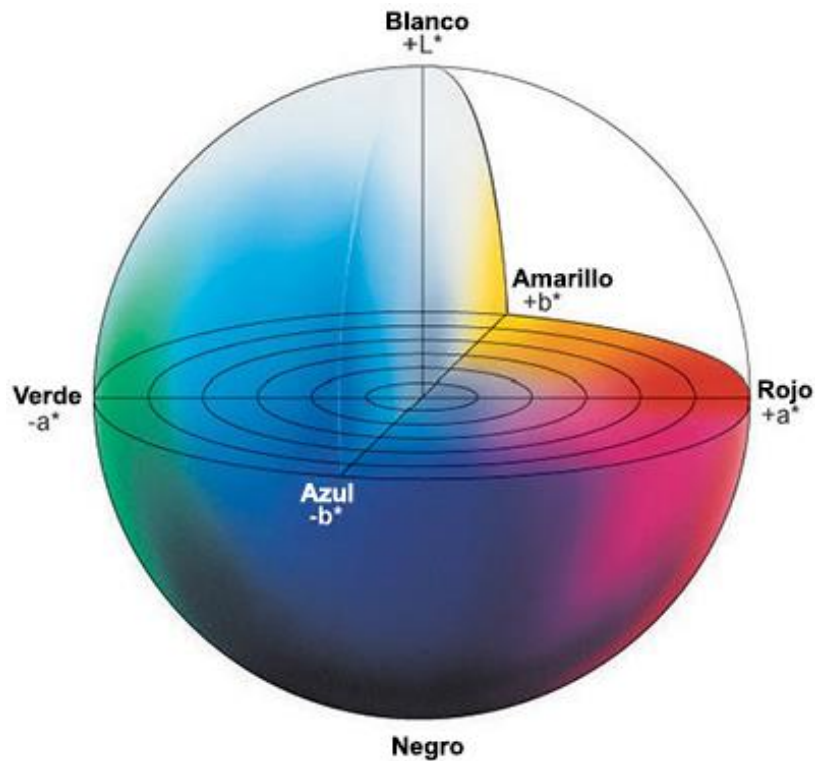


Figura 3.7 Sistema CIELAB. (<http://sensing.konicaminolta.com.mx/2014/09/entendiendo-el-espacio-de-color-cie-lab/>)

Este sistema, ha permitido obtener datos precisos de la naturaleza progresiva del cambio de color de los materiales debido a la exposición a la luz.

De acuerdo con diferentes referencias bibliográficas ^[60,79,120], el rango donde el sistema visual humano es capaz de distinguir un cambio de color en un material se establece en un valor ΔE_{ab}^* entre 1,6 y 3. Estos valores son orientativos, ya que están condicionados por el nivel de iluminancia, los colores y el contraste de los materiales utilizados.

3.9. Cálculo del Umbral de la exposición radiante efectiva (Modelo Berlín)

En el Modelo Berlín, desarrollado por Hilbert, Aydinli y Krochmann [70,121] en la década de los 80 del siglo XX, se define el daño sufrido DM por un objeto expuesto a la luz como una función de:

- La irradiancia efectiva E_{dm} de la fuente de luz que causa el daño,
- La respuesta espectral relativa $S(\lambda)_{dm,rel}$ según la sensibilidad de cada material expuesto, también denominada responsividad, y
- El tiempo de exposición t al que están expuestos los materiales a la irradiancia.

Así, DM se expresa como,

$$DM = f(E_{dm}, S(\lambda)_{dm,rel}, t)^3, \quad (3.10)$$

siendo, $S(\lambda)_{dm,rel}$ adimensional, t en horas h y E_{dm} en $W m^{-2}$.

³ Se ha respetado el criterio de índice utilizado por el modelo Berlín. El subíndice dm , indica que la irradiancia efectiva se evalúa de acuerdo con la responsividad espectral del material receptor.

El subíndice rel , indica que es un valor relativo.

Con E_{dm} , se considera el espectro de la radiación incidente y la respuesta espectral del material utilizado, y su cálculo,

$$E_{dm} = \int_{\lambda} E_{e,\lambda} S(\lambda)_{dm,rel} d\lambda. \quad (3.11)$$

$E_{e,\lambda}$ es la irradiancia espectral de la fuente de luz utilizada, en $W m^{-2} nm^{-1}$.

En el modelo Berlín se integra la irradiancia efectiva que produce daño E_{dm} con el tiempo de exposición t . El resultado es la cantidad de radiación *efectiva* recibida por el objeto expuesto,

$$H_{dm} = \int_t E_{dm,rel} dt. \quad (3.12)$$

H_{dm} es la Exposición radiante *efectiva*, en $W h m^{-2}$, y t el tiempo en horas (h).

Cuando una superficie coloreada se radia, surge la necesidad de saber cuánta exposición radiante efectiva (H_{dm}) es necesaria para que se aprecie una variación en el color de esa superficie. Este valor se obtiene mediante el cálculo del “*umbral efectivo de la exposición radiante*” $H_{s,dm}$, que se define como el valor de H_{dm} que causa un cambio de color de $\Delta E_{ab}^* = 1$.

La representación del valor H_{dm} con respecto a la diferencia de color ΔE_{ab}^* sirve como referencia para conocer el comportamiento del material respecto a la radiación visible.

El modelo Berlín, define la respuesta espectral de los materiales $S(\lambda)_{dm,rel}$, como una relación entre la absorbancia $\alpha(\lambda)$ del material expuesto y una función de la longitud de onda $f(\lambda)$, esto es,

$$S(\lambda)_{dm,rel} = \alpha(\lambda) \frac{1}{\lambda} f(\lambda). \quad (3.13)$$

Siguiendo este criterio, absorbancia y respuesta espectral, se ha obtenido una ecuación general para el comportamiento de los elementos empleados habitualmente en exposiciones. Los datos obtenidos de las medidas colorimétricas periódicas indican que el comportamiento de los diferentes materiales utilizados se puede representar con una función exponencial de $S(\lambda)_{dm,rel}$ del siguiente modo,

$$S(\lambda)_{dm,rel} = e^{[-b(\lambda-300)]}. \quad (3.14)$$

$S(\lambda)_{dm,rel}$ se normaliza a 1 para $\lambda = 300 \text{ nm}$, ya que tanto, la radiación de la luz del día, como la luz artificial, con longitudes de onda por debajo de este límite, son extremadamente raras en las iluminaciones utilizadas en los museos.

b es un valor constante que depende de la sensibilidad del material.

En la Tabla 3.2 se presentan valores para cinco materiales diferentes, según el modelo descrito.

Tabla 3.2 Valores del umbral de la exposición radiante efectiva $H_{s,dm}$ y valores b para la función de responsividad espectral relativa, cinco categorías de materiales utilizados en museos [79].

GRUPO	MUESTRAS	(W h/m ²)	b
a	Papel de baja calidad	5	0.038
b	Papel tela	1200	0.0125
c	Pinturas al óleo en lienzos	850	0.0115
d	Textiles	290	0.01
e	Colores al agua en papel tela	175	0.0115

3.10. Respuesta de los colorantes a la luz

Feller en 1968 [78] observó, que la pérdida de color de los colorantes producida por la radiación visible, era proporcional al logaritmo natural de la concentración del colorante. Esta relación es afín con la ecuación del comportamiento químico de los materiales de primer orden cinético, cuya expresión se escribe como,

$$\ln C_t = \ln C_0 + k_k t, \quad (3.15)$$

donde,

C_0 es la concentración inicial del colorante.

C_t la concentración de colorante después de un tiempo t_k .

k_c la constante de velocidad, cuyo valor depende de la reacción química y de la temperatura, su unidad es el recíproco del tiempo, si t se mide en horas (h), la unidad para k_c será h^{-1} ,

t el tiempo en horas, h .

Se denominan reacciones de primer orden, a aquéllas en las que se comprueba que la desaparición de una sustancia con el tiempo está claramente relacionada con su concentración en un momento dado, es decir, en las cuales, la velocidad de la reacción química depende del cambio en la concentración de un solo reactivo, en este caso el colorante utilizado [122-124].

Este método, como herramienta para medir el daño en obras de arte, requiere la manipulación de la obra, ya que hay que medir o comprobar las concentraciones de las sustancias de las que se compone la obra, una cuestión que hace que el método no se pueda utilizar en la mayoría de las ocasiones. Además, hay que considerar que la velocidad de decoloración de la obra no es selectiva. Esto significa que, al estudiar el comportamiento de una sustancia concreta, el resultado obtenido considerará que toda la obra va a actuar del mismo modo en la decoloración. Esto es impreciso, porque si la obra se compone de diferentes pigmentos o diferentes temperaturas, cada uno actuará con una k diferente.

Por estos motivos, el uso de este método se recomienda en modo experimental [71], y sirve para conocer el comportamiento de ciertos colorantes cuando están expuestos a radiación lumínica, siempre que estas medidas se realicen en laboratorio, y se puedan controlar los parámetros que influyen en la decoloración de los pigmentos y la manipulación de las muestras.

3.11. *Comportamiento térmico de los materiales*

Los efectos térmicos están asociados a la radiación IR. Este aspecto no es tan perjudicial como el efecto fotoquímico, pero su atenuación es también de vital importancia en museos y exposiciones, ya que, un aumento de la temperatura en la superficie de las obras, facilita que se produzca el efecto fotoquímico.

Además, la radiación IR, cuya proporción en la radiación total de las instalaciones puede alcanzar valores de hasta el 90 %, ocasiona daños térmicos que, en combinación con la humedad del aire, causa hendiduras por contracción, dilatación en la madera y alabamientos de tablas pintadas, además de ayudar a la proliferación de microorganismos. Algunos tipos de vidrios pueden llegar a sufrir rajaduras en la superficie y en las pinturas se puede acentuar el craquelado de las mismas. Todos estos factores contribuyen a la destrucción de las obras [7].

3.12. *Envejecimiento espectral de pinturas al óleo, acrílicas y gouaches en laboratorio*

Descritos los cuatro factores principales que influyen en el efecto fotoquímico sobre el daño en los materiales utilizados en el patrimonio cultural [79], y siguiendo la línea de los estudios analizados en esta tesis, en este punto, se va a describir la investigación realizada.

Se han irradiado con radiación visible pinturas al óleo, acrílicas y gouaches (*muestras*⁴), materiales utilizados habitualmente en obras del patrimonio, cuyo objeto es estimar el daño que produce el *efecto fotoquímico* de la radiación sobre ellos. Para lograr este fin, se ha desarrollado un proceso de envejecimiento espectral, en el que se han usado siete fuentes luminosas de tipo *led*, con siete longitudes de onda diferentes. El uso de estas fuentes, permite distribuciones espectrales de banda estrecha, optimizadas para los requisitos de exposición lumínica en museos y en la conservación de obras de arte y, en otros aspectos, ofrecen ventajas importantes de bajo consumo de energía y su vida útil y estabilidad es mayor que las fuentes utilizadas habitualmente [125].

Las condiciones ambientales de temperatura y humedad han sido monitorizadas siguiendo las recomendaciones que se aplican en museos y salas de exposiciones. Controlar el entorno tiene como objetivo, conseguir que el resultado del daño producido en las *muestras*, sea solo, el provocado por el efecto fotoquímico de la interacción luz-materia.

4 *Muestras*: A lo largo del capítulo cuando se haga referencia a las pinturas al óleo, acrílicas y guache utilizadas en este estudio se denominarán *muestras* para diferenciarlas de las pinturas que utilizan el mismo material en exposiciones.



Figura 3.8 Muestras al Óleo (23), Acrílicas (9) y Gouaches (7).

3.13. Configuración Experimental

3.13.1. Materiales y métodos

En esta investigación, se han utilizado treinta y nueve *muestras* sobre placas de vidrio de $250 \times 4 \times 2 \text{ mm}$ (largo, ancho, alto) (Figura 3.8), que fueron irradiadas con luz de diferentes longitudes de onda y niveles de irradiancia, para provocar en ellas un proceso de degradación fotoquímica. Las *muestras*, compuestas de diferentes materiales y colores, cuyas características se presentan en la Tabla A.1 del Anexo 7.3.1, fueron seleccionadas por los restauradores del Museo Reina Sofía y del Museo Thyssen de Madrid, de acuerdo a criterios prácticos, basados en su experiencia.

Para realizar el proceso de envejecimiento de las muestras, se dispuso de una sala con características de luminosidad, temperatura y humedad dentro de las recomendaciones establecidas ^[28]. Así, éste solo estaría condicionado por la irradiancia de las fuentes luminosas utilizadas.

Las *muestras*, se colocaron dentro de diez cajas de envejecimiento diseñadas específicamente para el estudio. Cada caja, contenía cuatro *muestras* y ocho zonas aisladas o células individuales. Para aumentar la uniformidad luminosa de las paredes de las células individuales se pintaron de color blanco, de modo que tuvieran un comportamiento lambertiano.

Dentro de cada célula aislada de cada caja se instaló un fotodiodo, para detectar y controlar posibles averías o una posible disminución de flujo de la radiación de salida de los *ledes*.

Para evitar cambios bruscos o niveles no recomendados de temperatura en la superficie de la *muestra*, y que éstos, pudieran influir en el efecto fotoquímico, cada caja estaba provista de un disipador de calor de aluminio, que a su vez tenía acoplado un ventilador. La temperatura se midió con un termopar instalado dentro de la zona de control en cada caja de envejecimiento. Cuando la temperatura aumentaba hasta el valor ajustado en el termopar, el ventilador se ponía en funcionamiento, hasta disminuir la misma a los niveles deseados.

En la Figura 3.9, se representa el esquema de cómo se encuentran ensamblados los diferentes componentes en las cajas de envejecimiento.

3.13.2. Procedimiento experimental

Inicialmente, las *muestras* se prepararon mediante la aplicación de una capa fina de pintura sobre las placas de vidrio, con un extensor de pintura estándar, para obtener un espesor constante de $120\ \mu\text{m}$ [126].

El siguiente paso fue el proceso de secado de las *muestras*, que permanecieron durante 9 meses, en una habitación oscura del

laboratorio, a una temperatura media de 25°C , antes de iniciar el ensayo de envejecimiento.

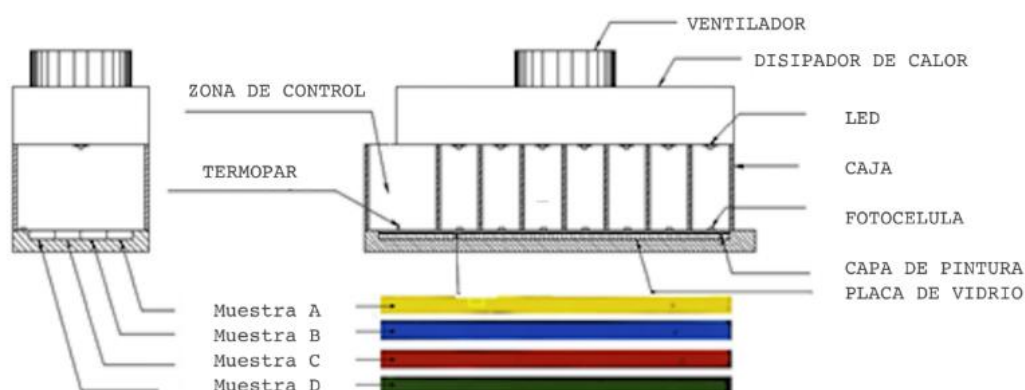


Figura 3.9 Esquema del contenido de cada caja de envejecimiento.

Para la fase de envejecimiento, de las ocho células individuales de cada caja donde estaban las *muestras*, siete fueron irradiadas mediante siete *ledes*, con diferentes longitudes de onda, siendo sus valores medios 447, 470, 505, 530, 590, 617 y 627 *nm*, (Figura 3.10) y la última no se irradió, y se utilizó como zona de control para observar cómo se modificaba la reflectancia de las *muestras* sin radiación.

En total, en el experimento se han utilizado setenta *ledes*. Dado que éste es un número elevado, se ha medido el nivel de irradiancia espectral de cada uno, con un espectrofotómetro *Stellarnet EPP2000*, y así se han obtenido las posibles variaciones entre ellos, que posteriormente se han considerado en las medidas de las reflectancias realizadas sobre las *muestras*.

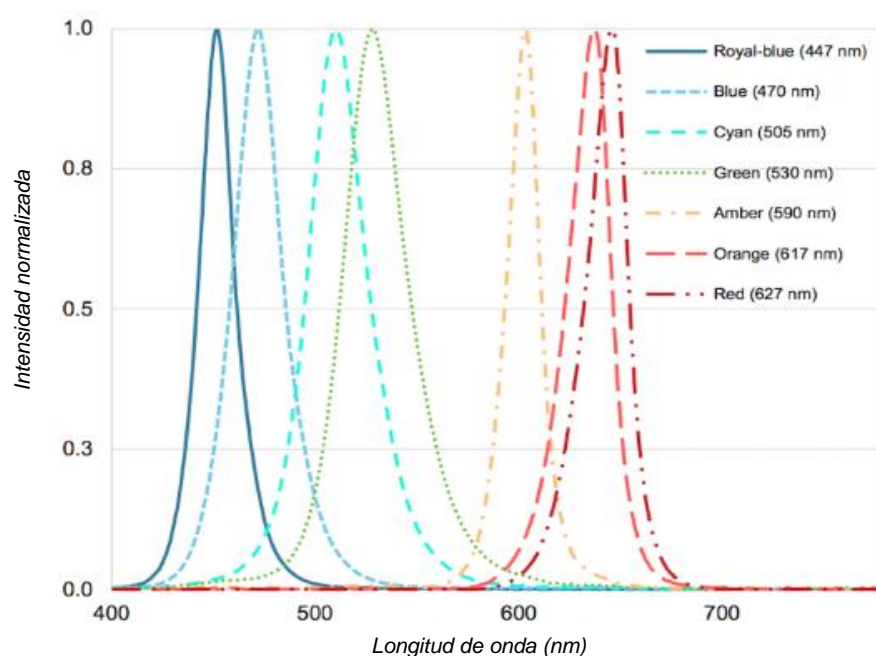


Figura 3.10 Espectro relativo de las fuentes de *ledes* utilizadas. Intensidad de cada tipo de *led* normalizada a uno.

La Figura 3.11, presenta una imagen del laboratorio de montaje del proceso de envejecimiento.



Figura 3.11 Montaje en el laboratorio.

Este proceso de envejecimiento de las *muestras* se realizó en diez sesiones y dos niveles de irradiancia diferentes; seis sesiones a un nivel bajo de irradiancia (*LIL*) y cuatro sesiones a un nivel alto de

irradiancia (*HIL*). Durante el proceso, se midió en cada sesión la reflectancia espectral de cada célula aislada. En la Figura 3.12 se muestra una sesión del proceso con un nivel alto de irradiancia *HIL*.



Figura 3.12 Sesión de envejecimiento de las muestras.

Debido a la dificultad de poder asegurar un flujo de salida idéntico para todos los *ledes* en la misma longitud de onda, además de medir la irradiancia espectral, también se controló el flujo de salida en un área central de $0,5\text{ mm}$ sobre el plano de cada *muestra*, en cada célula y durante todo el proceso de envejecimiento, con un medidor de potencia *Thorlabs*, que sirvieron para obtener un valor en tiempo real de irradiancia en cada longitud de onda. En la Tabla 3.3, se

muestra el valor medio de irradiancia para cada *led*. El valor medio total de *LIL* fue de $60,87 \text{ W m}^{-2}$ y el para *HIL* fue de 158 W m^{-2} . Estos valores de radiación medios, están próximos a los utilizados en museos y exposiciones, y en los dos casos, inferiores a los 500 W m^{-2} propuestos por la norma *ASTM D4303 – 10* ^[127], y a los 1440 W m^{-2} propuestos por la *ISO 11341:2004* ^[128], y cumple la ley de reciprocidad de Bunsen-Roscoe, ya que, como se describe en el apartado 3.4, se ha utilizado una iluminancia inferior a 1 *Megalux*.. De esta forma, no hay que considerar posibles desviaciones en la relación entre niveles de irradiancia y tiempo de exposición.

Tabla 3.3 Valores medios de irradiancia para cada *led*. Sesiones *LIL* y *HIL*.

λ (nm)	<i>LIL</i> (Wm^{-2})	<i>HIL</i> (Wm^{-2})
447	139.5	344.5
470	106.8	240.2
505	61.8	131.2
530	36.8	76.7
590	17.2	22.9
617	66.2	153
627	58.7	139.4

LIL: Nivel bajo de irradiancia. *HIL*: Nivel alto de irradiancia.

El valor utilizado para el cálculo de la radiación total fue el medido experimentalmente, para cada posición y cada sesión dentro de la célula, considerando cada longitud de onda.

3.13.3. Medidas de la reflectancia espectral de las *muestras*

Con el fin de conocer los cambios de color que han tenido las *muestras* debido a la radiación, se ha medido la reflectancia

espectral mediante un espectrofotómetro *PR – 655*, equipado con un objetivo *ms 2.5x*, y se ha calibrado con un blanco de referencia *Labsphere* del 99,8% (Figura 3.13).

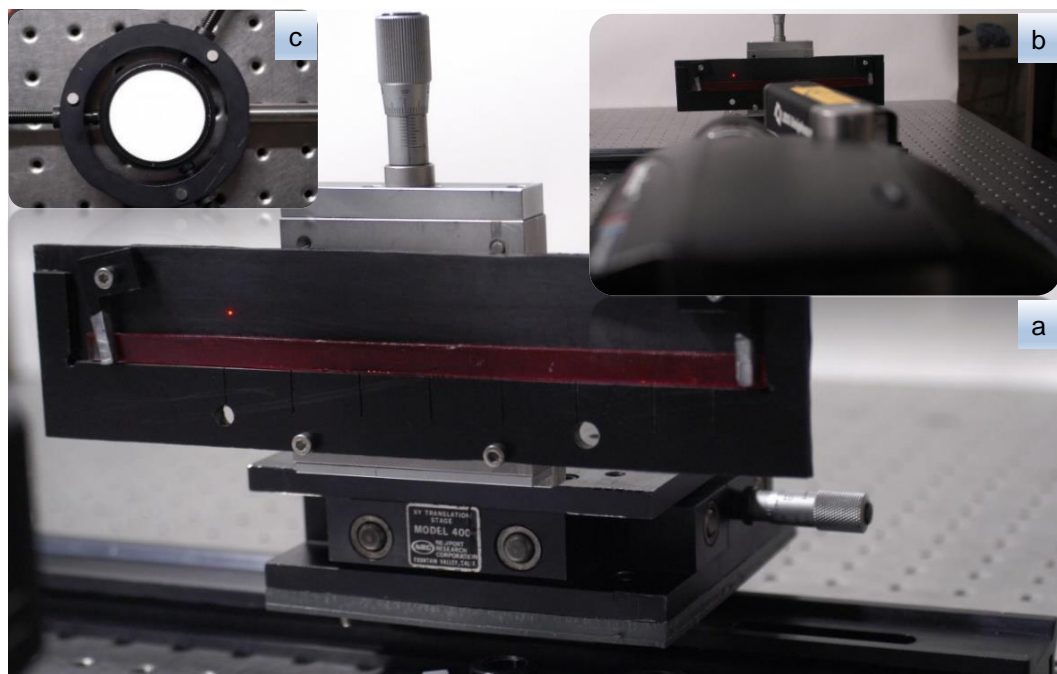


Figura 3.13 a) Montaje del sistema de desplazamiento micrométrico de calibrado para la realización de medidas sobre cada *muestra*, área de medición limitado a un círculo de radio de 0,5 mm. b) Detalle espectrofotómetro *PR – 655*, equipado con un objetivo *ms 2.5x*. c) Blanco de referencia *Labsphere* del 99,8%.

El área de medición se limita a un círculo de radio de 0,5 mm sobre cada *muestra*, mediante un sistema de desplazamiento micrométrico. El resultado total de la reflectancia espectral, fue un promedio de tres mediciones diferentes sobre el mismo punto.

Los valores de reflectancia espectral obtenidos han servido para evaluar los daños producidos en las *muestras*. Las reflectancias de cada sesión han sido diferentes, un síntoma de que en el interior del material se están produciendo cambios químicos, debidos a la

radiación absorbida que es la responsable de ellos. Por lo tanto, la evaluación del daño realizada en este trabajo se ha considerado sobre la energía absorbida por los materiales. H. Kim et al. en el 2000 [129], encontraron que el papel coloreado manifiesta una estrecha relación entre el factor de daño espectral y la absorbancia espectral.

Para obtener la cantidad de energía absorbida por las *muestras* usadas en este trabajo, en cada medida realizada se ha considerado:

- el valor de reflectancia obtenido en las superficies,
- la cantidad de energía irradiada por los *ledes* (*LIL*, *HIL*), y
- la diferencia entre el valor de las reflectancias medidas.

En el proceso de envejecimiento, además de lo anterior, también se tuvieron en cuenta los posibles cambios de las *muestras* que no fueran producidos por la irradiancia. Para detectar estos cambios, se empleó una zona de control sin irradiar, como elemento de registro de alteraciones no fotoquímicas. Para determinar los cambios experimentados en cada sesión, se midió la reflectancia espectral (del mismo modo que para las zonas irradiadas) de la zona no expuesta antes de irradiar, y se denominó como zona cero o de control en la sesión cero, $\rho_{\lambda}^{0,0}$. En las siguientes medidas, a la zona no irradiada se nombró como $\rho_{\lambda}^{0,sz}$, con el fin de verificar si se modificaba la reflectancia en el área elegida y así, aplicar estas

variaciones al resto de las zonas irradiadas. El superíndice utilizado en la reflectancia $\rho (0,sz)$, el 0 indica la zona donde se está midiendo, y la sz es un número que indica la sesión de envejecimiento en la que se ha realizado la medida.

El cambio espectral sin exposición a la luz que se ha producido por una acción "no fotoquímica", se ha evaluado como, una diferencia entre reflectancias de cada sesión con respecto a la sesión cero,

$$\Delta\rho_{\lambda}^{0,sz} = \rho_{\lambda}^{0,0} - \rho_{\lambda}^{0,sz} \quad (3.16)$$

Con los resultados obtenidos se ha comprobado que $\Delta\rho_{\lambda}^{0,sz}$ se modifica para cada fase de medidas. Por tanto, se han producido cambios en la reflectancia debidos a efectos no fotoquímicos.

En la Figura 3.14 se representan las reflectancias medidas en la zona cero en la *muestra* 14, en cinco sesiones diferentes ($\rho(0,0)$, $\rho(0,2)$..., $\rho(0,5)$), siendo ($\rho(0,0)$) la primera medida antes de haber irradiado la *muestra*. Como se puede observar en la gráfica, en esta zona se ha modificado la reflectancia, aunque no ha sido irradiada.

La evolución de la $\Delta\rho$ en la zona 0 se obtiene con la (eq.3 – 20). Para el ejemplo de la Figura 3.14 sería,

$$\Delta\rho^{0,1} \text{ muestra } 14 = \rho_{\lambda}^{0,0} \text{ muestra } 14 - \rho_{\lambda}^{0,1} \text{ muestra } 14,$$

$$\Delta\rho^{0,2} \text{ muestra } 14 = \rho_{\lambda}^{0,0} \text{ muestra } 14 - \rho_{\lambda}^{0,2} \text{ muestra } 14.$$

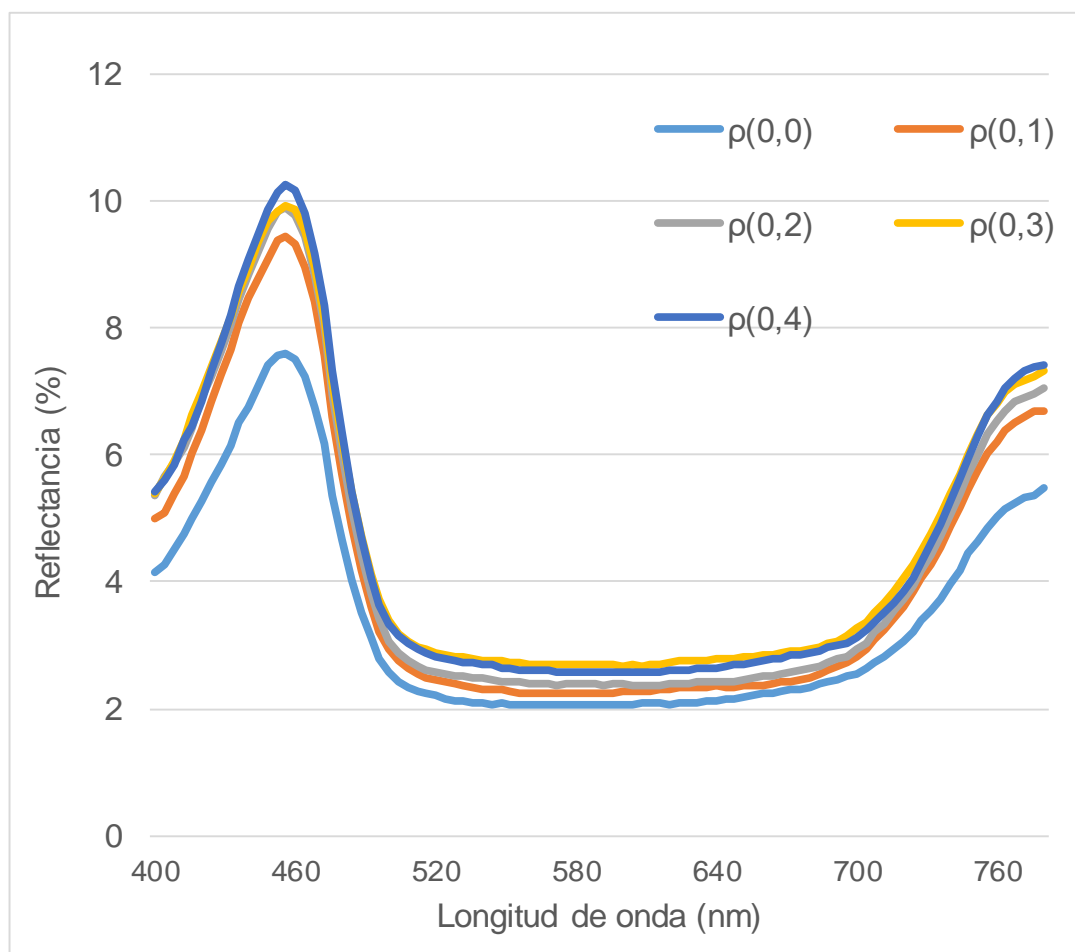


Figura 3.14 Representación gráfica de las medidas de reflectancia de la muestra 14 (óleo) en la zona “cero”, sin irradiar, con ajuste con respecto al blanco de referencia. Los datos corresponden con la primera medida $\rho(0,0)$ antes de irradiar y con las seis sesiones siguientes.

Las variaciones de reflectancia en las áreas no radiadas, hace evidente que, se debe considerar el cambio experimentado por el efecto no fotoquímico en las áreas radiadas, de modo que a los valores de reflectancias medidos, se les ha de aplicar la corrección obtenida en la zona cero en cada sesión. Para ello, se ha seguido el siguiente método:

- a. Medida de la reflectancia espectral de las *muestras* en cada celda *cz*: en la sesión 0, la primera medida de reflectancia en las zonas que se iban a irradiar se denominó $\rho_{\lambda}^{cz,0}$, y las siguientes medidas, que corresponden con las diferentes fases *sz*. Las iniciales con las que se ha identificado cada *led* y cada medida es $\rho_{\lambda}^{cz,sz}$, siendo *cz* (1, 2, ..., 7) una por cada *led*, y *sz* (1, 2, ..., 10) las diez sesiones.
- b. Cálculo del cambio de la reflectancia para cada posición y sesión: el valor obtenido, es cómo se ha modificado la reflectancia en cada ciclo de envejecimiento, comparándola con la primera medida realizada.

$$\Delta\rho_{\lambda}^{cz,sz} = \rho_{\lambda}^{cz,0} - \rho_{\lambda}^{cz,sz}. \quad (3.17)$$

- c. Corrección de la desviación: para considerar los cambios de reflectancia reales, debidos únicamente a los efectos fotoquímicos, se procede de forma que, a los valores obtenidos de reflectancia en las zonas radiadas hay que restar los cambios no fotoquímicos, de modo que,

$$\Delta\rho_{\lambda}^{p_{cz,sz}} = \Delta\rho_{\lambda}^{cz,sz} - \Delta\rho_{\lambda}^{0,sz}. \quad (3.18)$$

$\Delta\rho_{\lambda}^{p_{cz,sz}}$ es el valor de la diferencia de reflectancia con respecto a la primera medida, producido únicamente por el efecto fotoquímico.

El índice superior p sirve para indicar que la reflectancia sólo se debe al efecto fotoquímico.

En la Figura 3.15 se representan las diferencias de reflectancia $\Delta\rho_{\lambda}^{pcz,sz}$ en las *muestras* 11 y 14 con respecto a la zona cero en dos sesiones diferentes.

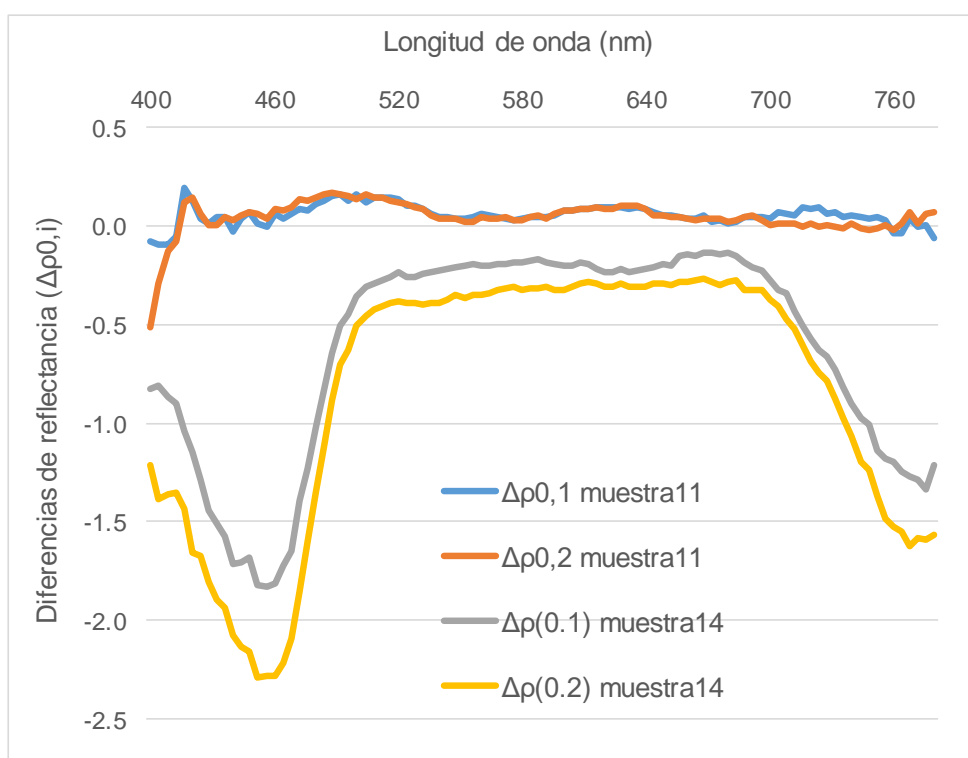


Figura 3.15 Se representan las diferencias de reflectancia en las *muestras* 11 y 14. Las mediciones de reflectancia realizadas en la zona no iluminada se representan, desde la primera medida con respecto a la segunda medida ($\Delta\rho^{0,1}$) y con respecto a la tercera medida ($\Delta\rho^{0,2}$). $\Delta\rho^{0,1}$ muestra 11 y la $\Delta\rho^{0,1}$ muestra 14, línea azul y línea gris, respectivamente. $\Delta\rho^{0,2}$ muestra 11 y $\Delta\rho^{0,2}$ muestra 14, líneas naranja y amarilla, respectivamente.

A partir de los valores de reflectancia obtenidos, se calcularon las coordenadas cromáticas $L^*a^*b^*$ y la diferencia de color ΔE_{ab}^* . Para estos cálculos, se usó como una medida patrón el espacio *CIELAB* [56], que sirve para conocer el daño producido en los materiales, siguiendo la recomendación de la CIE 15:2004 [79] descrita en el

apartado 3.4.1 de este capítulo. ΔE_{ab}^* se ha calculado para todas las *muestras* mediante la ecuación (3.13).

3.13.4. Configuración Experimental. Daño Relativo

En el estudio se ha introducido el concepto factor de daño relativo Rd , que se establece como una relación entre el cambio de color producido ΔE_{ab}^* y la exposición radiante efectiva absorbida H_{dm_abs} ; es decir,

$$Rd = \frac{\Delta E_{ab}^* (s1, s2, \dots, s10)}{H_{dm_abs} (s1, s2, \dots, s10)}, \quad (3.19)$$

donde, ΔE_{ab}^* es adimensional, el parámetro Rd en $m^2 W^{-1} h^{-1}$. La energía absorbida por las *muestras* es H_{dm_abs} en $W h m^{-2}$. Su cálculo se realiza a partir de

$$H_{dm_abs} = \iint_{t, \lambda} E_{e, \lambda} s(\lambda) \alpha(\lambda) dt d\lambda, \quad (3.20)$$

teniendo en cuenta, que la absorbancia espectral es $\alpha(\lambda) = (1 - [\rho(\lambda) + T(\lambda)])$. En la investigación, la transmitancia $T(\lambda) = 0$, y la reflectancia $\rho(\lambda)$ se obtienen de los valores medidos sobre las *muestras*.

Se ha observado, que el comportamiento de Rd depende del material de la *muestra* (óleo, acrílico y gouache). Por ello, los diferentes tipos de material utilizados se han estudiado por separado, y se ha desarrollado un modelo para cada uno.

Desde el punto de vista experimental, en las diez sesiones la medición de los valores de reflectancia de las *muestras* fueron similares para la misma longitud de onda.

Se ha registrado, que la velocidad de envejecimiento de las *muestras* no ha sido uniforme en su comienzo, aunque la irradiancia de la fuente utilizada, ha sido similar para todas ellas. El daño relativo ha sido diferente, incluso para la misma longitud de onda de la luz, al depender de la reflectancia espectral de cada *muestra*, y, además, cada una de ellas tendrá una absorbancia espectral distinta. Como consecuencia, su envejecimiento será más o menos rápido. Aunque no se hayan obtenido valores de envejecimiento uniformes, los valores de $H_{dm_{abs}}$ obtenidos tienen tolerancias dentro de la norma *ISO* [128]. Dada la coherencia de los resultados entre los dos niveles de radiación, *LIL* y *HIL*, a los que fueron sometidas las *muestras*, se puede inferir, que los resultados son consistentes con la ley de reciprocidad, descrita en el apartado 3.4 de este capítulo.

3.14. Resultados y Discusión

Los datos obtenidos en esta investigación para las diversas *muestras* ensayadas han sido procesados de forma agrupada por cada tipo de pintura del estudio, estos valores se exponen en los siguientes apartados.

3.14.1. Daño relativo (R_d) de cada *muestra*

Se han calculado los percentiles del daño relativo R_d , en el 5%, en el 95% y en su valor medio (R_d_Mean), de las medidas realizadas. En la Figura 3.16 se representan los resultados.

Debido a que el R_d en la fase inicial, es mucho mayor que en las fases finales, la representación de los gráficos se ha realizado en una escala logarítmica natural, que mejora la visualización y comprensión de los datos. Para ello se ha nombrado a X como el $\ln(H_{dm_abs})$, $X = \ln(H_{dm_abs})$.

Los datos logarítmicos de H_{dm_abs} son valores derivados de la cantidad de energía absorbida por las *muestras* durante las diez sesiones, y van desde $X = 4$ a $X = 11$.

En la investigación la cantidad máxima irradiada por la fuente utilizada sobre las *muestras* ha sido de $H_{dm} = 81700 \text{ W h m}^{-2}$, lo que supone una iluminancia equivalente de $13 \times 10^6 \text{ lx h}$. Para tener una referencia de lo que significa este valor en el entorno del patrimonio cultural, si esta cantidad se aplica en un museo que está abierto 3500 horas al año con una iluminancia media de 100 lx , se estima que las obras se han expuesto a un envejecimiento equivalente, en tiempo, a 37 años.

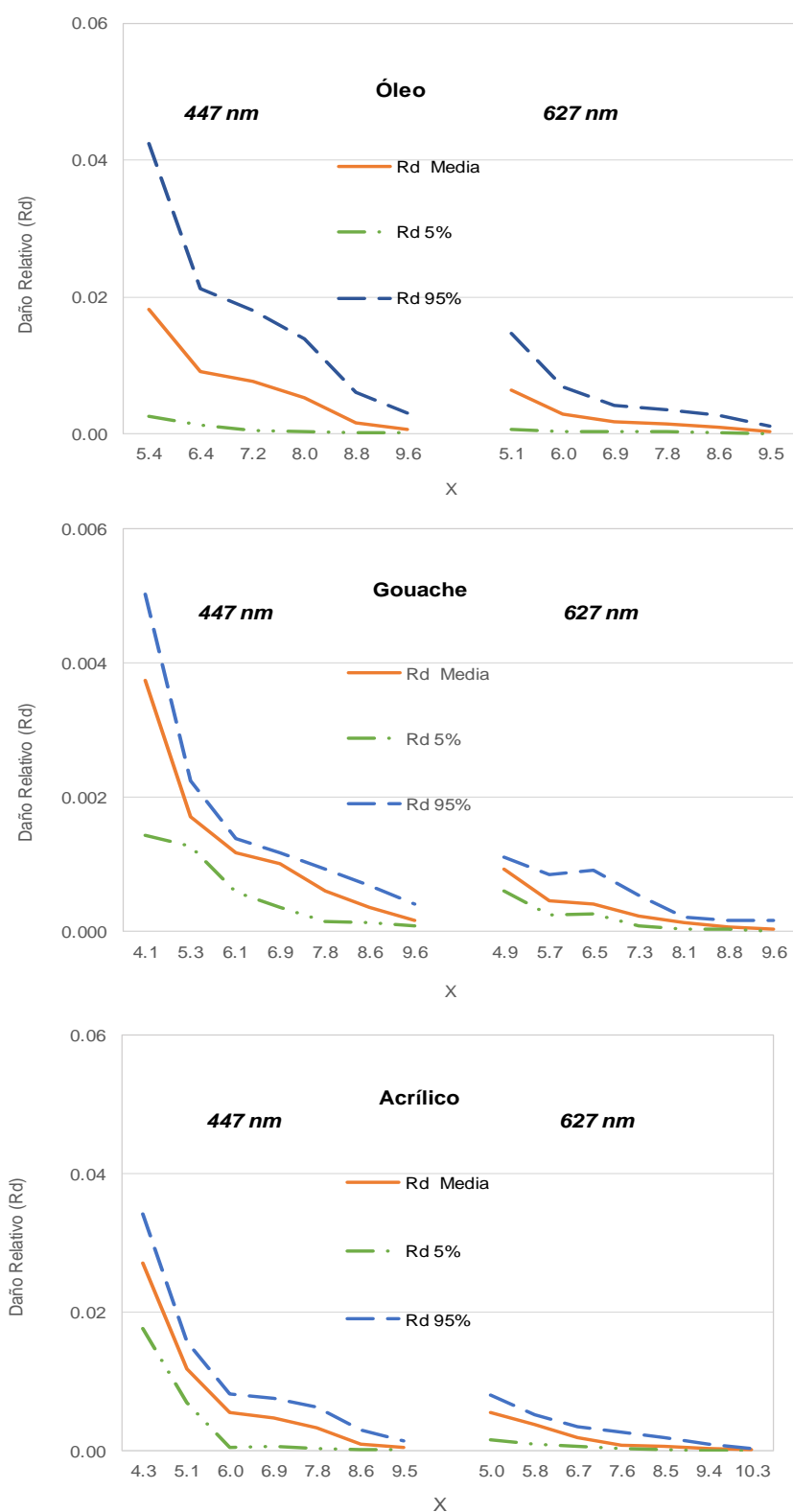


Figura 3.16 Percentiles y valores medios obtenidos para las muestras al óleo, gouache y acrílico. Como ejemplo se muestra el daño producido para los espectros de longitud de onda $\lambda = 447 \text{ nm}$ y $\lambda = 627 \text{ nm}$.

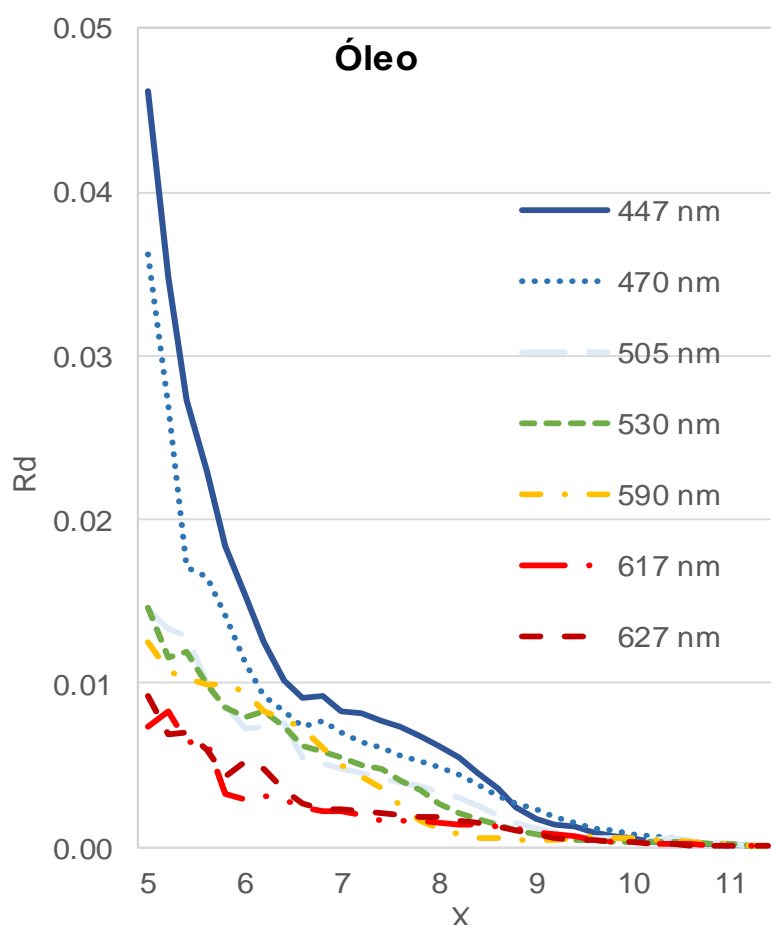


Figura 3.17 Valores de Rd con respecto a la cantidad de radiación recibida de las muestras al óleo.

En la Figura 3.17, se representan los valores de daño relativo Rd calculados, con respecto a la cantidad de energía radiante efectiva, de forma logarítmica $X = \ln(H_{dm_abs})$, sobre las *muestras* al óleo. Para obtener los valores de Rd , se ha aplicado la ecuación (3.19).

Una consecuencia, en la observación del factor de daño relativo Rd , es que actúa como una función de la longitud de onda de la fuente y de las características fotoquímicas de las *muestras*. Además, en la fase inicial de envejecimiento, los cambios de Rd

están más acelerados en comparación con las etapas siguientes, que se mantienen más estables.

3.14.2. Modelo propuesto, análisis del daño Relativo Rd

En el estudio del daño relativo Rd , para los diferentes materiales (óleo, acrílico y gouache), se analiza, la relación entre la variación del deterioro de cada *muestra*, con respecto a la propia evolución temporal del sistema. De este análisis, se obtiene un patrón general, que identifica el proceso de envejecimiento experimentado por las *muestras*, cuando están sometidas a una cantidad de radiación con una distribución espectral específica, en este caso, para las siete longitudes de onda λ utilizadas, desde 447 nm a 627 nm. Señalar que el modelo, sería aplicable a cualquier otra λ elegida fuera de este rango, para cada longitud de onda del proceso de envejecimiento, de tal manera que el daño relativo Rd se puede expresar como,

$$Rd = e^{[k_1X+k_2]}. \quad (3.21)$$

Los valores k_1 y k_2 , se han obtenido en un ajuste matemático polinomial realizado entre el daño relativo Rd y la exposición radiante efectiva absorbida medida H_{dm_abs} , para cada material utilizado y sus valores se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Valores k_1, k_2 obtenidos mediante ajuste matemático de Rd y H_{dm_abs}

Longitud de onda	Óleo		Acrílico		Gouache	
(nm)	k_1	k_2	k_1	k_2	k_1	k_2
447	-1.008	2.0696	-0.9128	0.6037	-0.5294	-3.4404
470	-0.8871	1.0718	-0.9433	0.9282	-0.594	-2.676
505	-0.8511	0.1942	-0.8487	-0.3888	-0.4259	-3.9222
530	-0.8104	-0.2195	-0.8074	-0.6982	-0.6366	-2.6748
590	-0.7418	-1.0284	-0.9719	0.6654	-0.5163	-4.1337
617	-0.7864	-1.024	-0.8917	-0.4019	-0.6041	-3.6567
627	-0.8005	-0.8911	-0.8119	-1.0661	-0.4999	-4.7728

Rd : Daño relativo. H_{dm_abs} : Exposición radiante efectiva absorbida.

En la Figura 3.18 se representa el modelo obtenido con la ecuación (3.21). Los resultados indican, que el daño de las *muestras* de gouache es menor que el de las *muestras* de óleo y acrílico. En periodos largos expuestos a la misma radiación, el comportamiento se iguala.

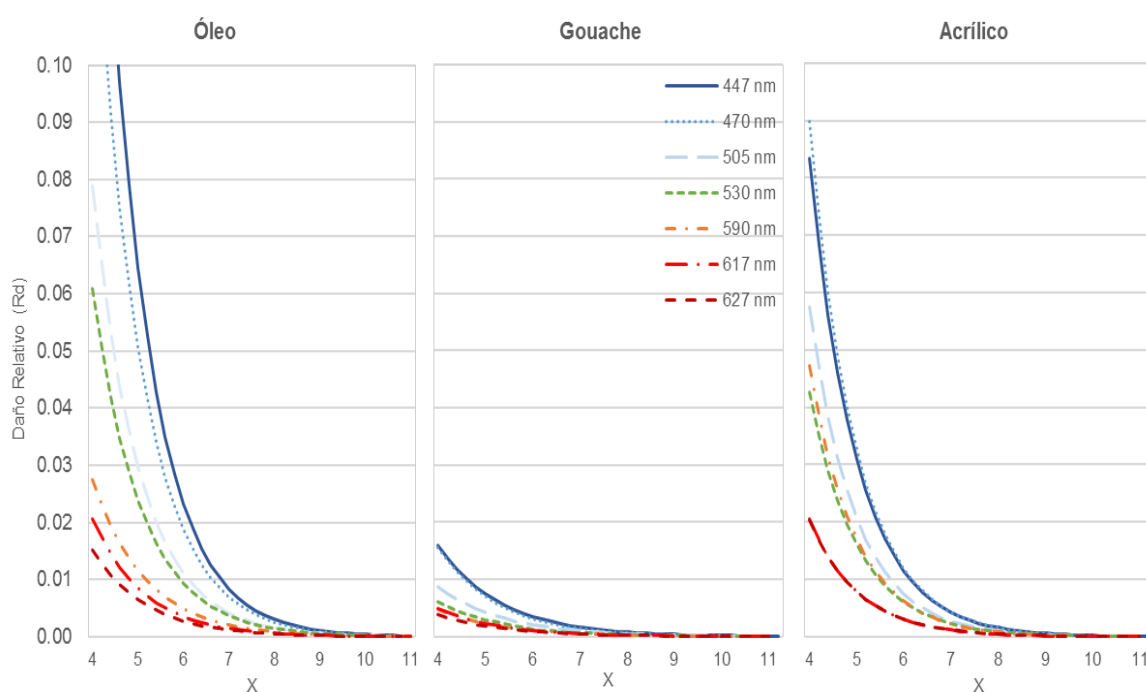


Figura 3.18 Modelo espectral de daño después del ajuste, para las muestras al óleo, acrílico y gouache.

3.14.3. Modelo Propuesto. Daño espectral

En el daño espectral estudiado, se realiza el segundo nivel de análisis de la investigación, y se propone, un modelo de daño espectral que determina la variación temporal del envejecimiento, según la respuesta espectral del material utilizado en las *muestras*.

El modelo en el que se basa esta investigación ^[121], es una relación entre el daño espectral, la longitud de onda y la capacidad de respuesta del material, ecuación (3.14). En el modelo propuesto por la CIE ^[79], la λ utilizada para determinar la responsividad de los materiales y la constante b , comienza en 300 nm. En este ensayo de envejecimiento, se han adecuado estos valores de cálculo para la longitud de onda mínima utilizada, que es de 447 nm. Este ajuste, no influye en aplicación del modelo, ya que en los espacios expositivos el uso de λ menores a 400 nm son una rara excepción, además de una situación no deseable, como se indica en la conservación preventiva.

En el modelo, se ha desarrollado un factor de daño relativo espectral $Rd(\lambda_i)$ dependiente de λ , cuyo valor se obtiene de aplicar al valor conocido $Rd(\lambda_1)$, en una función dependiente del material y de λ , según la expresión general,

$$Rd(\lambda_i) = Rd(\lambda_1) f(\lambda), \quad (3.22)$$

donde $f(\lambda)$ es la responsividad espectral relativa de cada material, obtenido en la ecuación (3.14) con diferentes λ , si se sustituye $f(\lambda)$ por la responsividad espectral,

$$Rd(\lambda_i) = Rd(\lambda_1) e^{[-b\lambda(\lambda_i-447)]}. \quad (3.23)$$

$Rd(\lambda_1)$, procede de la ecuación (3.21) en el apartado 3.14.2.

Si se analizan las gráficas en un momento de envejecimiento, $X = 6$ y para una irradiancia de $\lambda = 447 \text{ nm}$, los valores obtenidos de Rd son,

$$Rd_{led(447nm)} = 0,0189 \text{ m}^2 \text{ W}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ para óleo,}$$

$$Rd_{led(447nm)} = 0,0075 \text{ m}^2 \text{ W}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ para acrílico,}$$

$$Rd_{led(447nm)} = 0,0021 \text{ m}^2 \text{ W}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ para gouache,}$$

es decir, el valor de daño relativo Rd es 2,52 y 9 veces mayores, en las *muestras* al óleo, que en las acrílicas o en gouache, respectivamente. Esto significa, que las *muestras* al óleo se comportan como un material más sensible que el acrílico y que el gouache para radiaciones de $\lambda = 447 \text{ nm}$.

Del mismo modo, si se analiza el comportamiento en longitudes de onda más largas, como $\lambda = 627 \text{ nm}$, el valor Rd para $X = 6$, será:

$$Rd_{led(627nm)} = 0,0032 \text{ m}^2 \text{ W}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ en óleo,}$$

$$Rd_{led(627nm)} = 0,0028 \text{ m}^2 \text{ W}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ en acrílico,}$$

$$Rd_{led(627nm)} = 0,0004 \text{ m}^2 \text{ W}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ en gouache.}$$

Para esta λ el material más sensible sigue siendo el óleo, aunque su comportamiento, es similar al acrílico. El daño relativo Rd es 1,1 y 8 veces mayores en el óleo que para el acrílico y que en gouache, respectivamente.

Si aumentamos el tiempo de envejecimiento y usamos valores de $X = 10$:

- i. El daño a $\lambda = 447 \text{ nm}$ es mayor en las *muestras* al óleo en 1,2 veces sobre el acrílico y 2,5 con respecto al gouache.
- ii. El daño a $\lambda = 627 \text{ nm}$, las diferencias son de 1,2 y 2,2 del óleo mayor que acrílico y gouache respectivamente.

Se observa, que a medida que los materiales envejecen, el deterioro que se produce en ellos es similar, independientemente de la longitud de onda que se utilice.

Como ejemplo del proceso para una *muestra* al óleo, en la Tabla 3.5 se presentan los valores de ΔE_{ab}^* y Rd después de diez años de recibir radiación. En el ejemplo se ilumina la *muestra* con dos tipos de luz monocromática, con un valor medio de 100 lx , durante 3500 h/año . Para una fuente monocromática, *led* de 627 nm , la irradiancia media por hora equivalente absorbida es $0,79 \text{ Wm}^{-2}$ según el modelo, y si se ilumina con un *led* de 447 nm , la irradiancia media por hora

equivalente es $2,72 \text{ Wm}^{-2}$ según el modelo. Cada longitud de onda tiene un H_{dm_abs} diferente, aunque se irradie durante el mismo tiempo. Al tener más energía el *led* de $\lambda = 447 \text{ nm}$, y si además como es el caso el material es más sensible a esta λ , el *Rd* que se produce en la *muestra* es mayor.

Tabla 3.5 *Rd* y ΔE_{ab}^* , para dos tipos de iluminación monocromática, dos *LED*, de 447 nm y 627 nm , después de envejecer las muestras al óleo, el equivalente a diez años de iluminación con 100 lux .

Longitud de onda (nm)	<i>E</i> (Wm^{-2})	H_{dm} (Whm^{-2})	<i>X</i>	<i>Rd</i> ($\text{m}^2 \text{ W}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	ΔE_{ab}^*
447	2.72	95200	11.46	9.11E-05	8.67
627	0.79	27650	10.23	1.25E-04	3.46

λ : Longitud de onda. E_e : Irradiancia. H_{dm} : Exposición radiante efectiva absorbida.
 $X = \ln(H_{dm})$: Exposición radiante efectiva. *Rd*: Daño relativo. ΔE_{ab}^* : Diferencia de color.

3.14.4. Dependencia del parámetro *b* con el tiempo

En la CIE 157 ^[79], el parámetro *b* es un valor constante para cada material, pero no dependiente de la longitud de onda. En este estudio, se han analizado los datos obtenidos en el *Rd* para observar el comportamiento de *b* con respecto a λ . De este modo, se ha calculado el factor *b* mediante la siguiente expresión,

$$b(\lambda) = \frac{-\ln\left(\frac{Rd(\lambda_i)}{Rd(\lambda_1)}\right)}{(\lambda_i - \lambda_1)} \quad (3.24)$$

Esta ecuación deriva de la ecuación (3.23).

En la Figura 3.19 se representa gráficamente el valor del parámetro $b(\lambda)$ para las *muestras* al óleo, calculado con la ecuación (3.24) y con

distintas longitudes de onda utilizadas en el estudio. En la figura se observa como el comportamiento del factor $b(\lambda)$, depende de la característica espectral de la fuente luminosa utilizada y de la cantidad de radiación absorbida por el material.

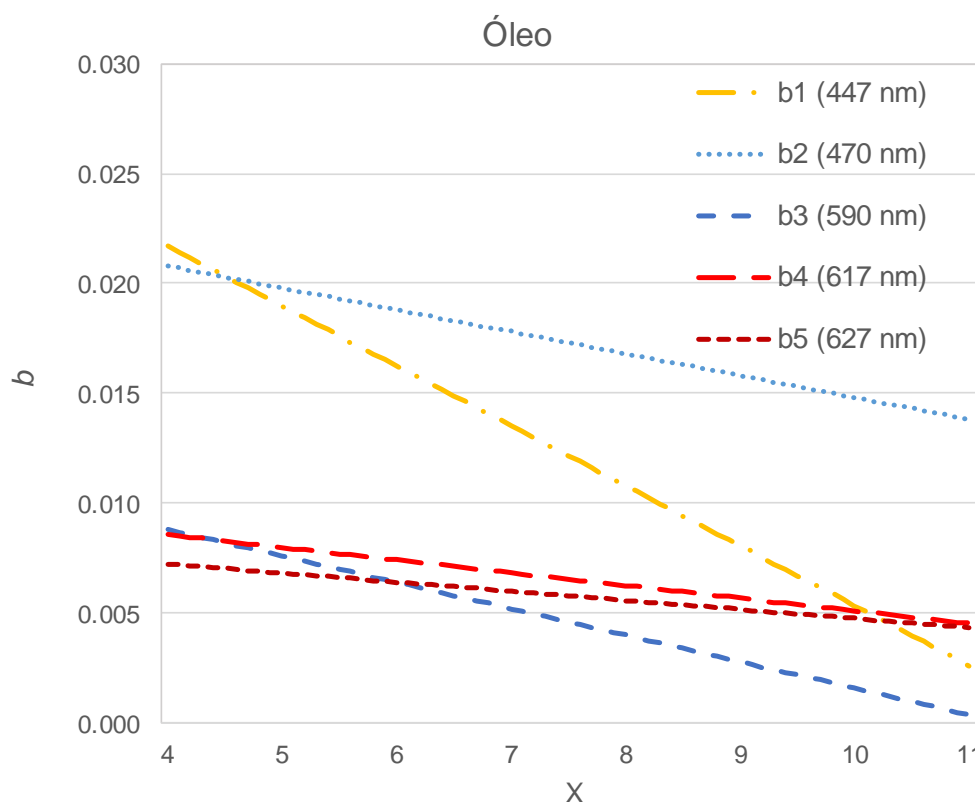


Figura 3.19 Comportamiento de b para la muestra al óleo con cinco longitudes de onda, en relación al tiempo de envejecimiento.

Con los datos calculados, el factor b no se puede considerar un valor constante para los materiales y fuentes luminosas utilizadas en esta investigación. En consecuencia, la relación entre el daño relativo de dos longitudes de onda diferentes ($Rd(\lambda_1)/Rd(\lambda_2)$) con dos exposiciones radiantes absorbidas distintas (H_{dm1_abs} y H_{dm2_abs}) no será constante.

En los resultados vistos anteriormente, la diferencia entre Rd , a una longitud de onda específica (λ_i) y Rd , en la longitud de onda de referencia (λ_1), es mayor cuando la *muestra* es nueva. En la misma línea, el parámetro b tiene una dependencia del tiempo, y disminuye o aumenta cuando la *muestra* está más envejecida, lo que significa que la diferencia en las dos longitudes de onda en ese momento es menos importante. Por tanto, según estos resultados, el análisis espectral del daño $Rd(\lambda)$ es menos relevante para las pinturas antiguas.

Esta diferencia permite, mediante un ajuste matemático de los valores obtenidos en $b(\lambda)$, conseguir un modelo de b general para cada *muestra*, que es independiente a la longitud de onda, y dependiente de la cantidad de irradiación recibida. La ecuación correspondiente es,

$$b_{\text{óleo}} = -0,0012 \ln(H_{dm_abs}) + 0,0182 \quad (3.25)$$

$$b_{\text{acrílico}} = -0,000457 \ln(H_{dm}) + 0,0096 \quad (3.26)$$

$$b_{\text{gouache}} = -0,000668 \ln(H_{dm}) + 0,0102 \quad (3.27)$$

La línea azul, de la Figura 3.20 representa b para la *muestra* al óleo, la línea naranja el cambio de b para el acrílico, y la línea morada la variación de b para gouache.

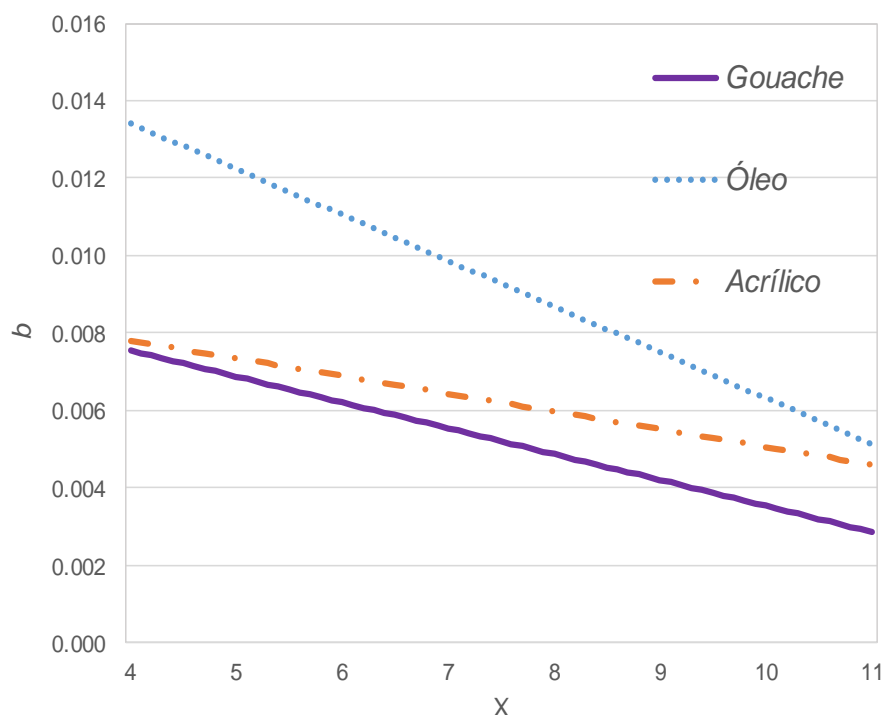


Figura 3.20 Valor de b para las muestras utilizadas en el estudio.

Si se hace una comparación entre el $b = 0,0115$ constante para el óleo, propuesto por la CIE ^[79], y el b variable de esta investigación, en el modelo el valor coincide cuando las *muestras* al óleo se han radiado con 270 W h m^{-2} ($X = 5,6$).

3.14.5. Aplicación del daño relativo R_d en iluminación

Este estudio, se realizó utilizando siete fuentes de iluminación monocromáticas, pero la luz incidente habitualmente no es monocromática. Por ello, es conveniente en este tipo de estudios buscar su uso en aplicaciones prácticas. En este apartado se propone una aplicación del modelo obtenido en sistemas de iluminación y las ventajas de ello.

Con las medidas y el modelo propuesto, se puede deducir el daño relativo espectral $Rd(\lambda)$ para ciertos tiempos de exposición (t_1, t_2, \dots, t_n) , con fuentes utilizadas, habitualmente para iluminar espacios expositivos.

Como ejemplo, si se aplica el modelo de daño espectral de la ecuación (3.27) a dos tiempos de envejecimiento, $X_{t1} = 9$ y $X_{t2} = 10$, se puede representar el valor de $Rd(\lambda)$ espectral para la fuente luminosa que se esté utilizando en X_{t1} y X_{t2} . En la Figura 3.21, se representan gráficamente los valores del Rd para el óleo, con λ entre $400 - 780 \text{ nm}$. En este ejemplo, el modelo se aplica a una fuente de luz que tendría las características espectrales de los siete *ledes* usados en esta investigación. El comportamiento de Rd para esta fuente, se obtiene según el modelo de “análisis de daño relativo”. En la Figura 3.21 se observa cómo afecta cada λ de la fuente al envejecimiento del material, es decir, la influencia en el Rd según las características espectrales de la fuente. Además, se pueden comparar el $Rd(\lambda)$ en diferentes tiempos de envejecimiento.

En el análisis de la Figura 3.21 se observa que:

- Cuando aumenta el tiempo de exposición del óleo a la fuente luminosa, el valor proporcional del daño relativo Rd disminuye, lo que significa, que el daño o la cantidad de energía absorbida que ha producido daño, afecta menos.

- Con esta fuente luminosa, la radiación a longitudes de onda más cortas, tiene un efecto importante en el daño relativo Rd del óleo. A medida que la pintura envejece, la relación entre el daño de longitudes de onda λ corta y larga disminuye, aunque sigue siendo más importante en longitudes de onda λ cortas.

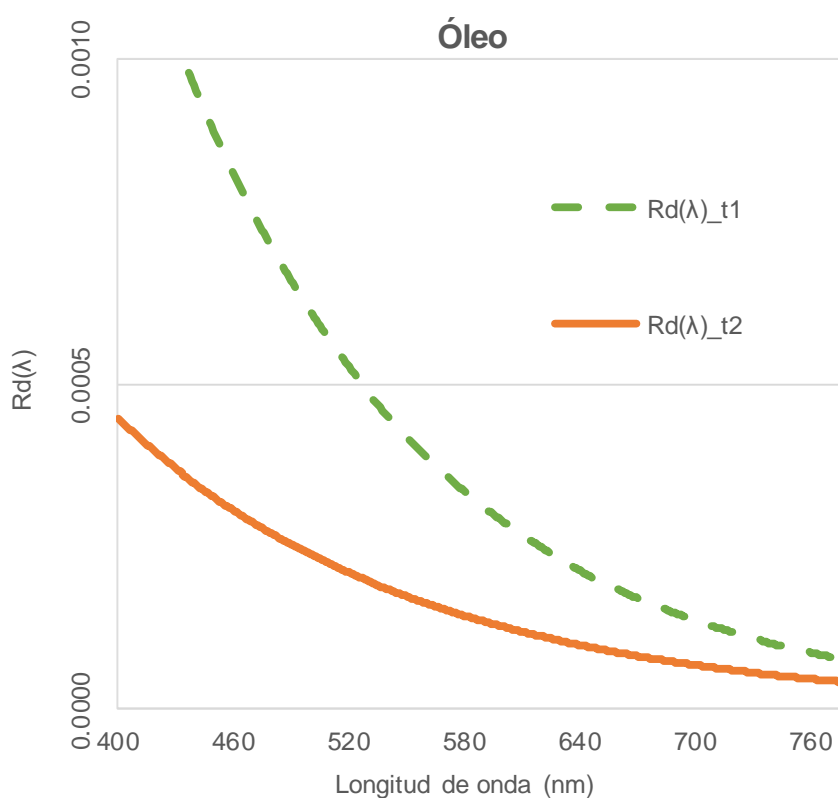


Figura 3.21 Comportamiento espectral de $Rd(\lambda)$ del óleo, para los tiempos X_{t1} y X_{t2} para una fuente multispectral.

Como se puede observar en el ejemplo, la relación Rd determina el comportamiento en las pinturas al óleo expuestas a una fuente multispectral de 400 a 780 nm. Del mismo modo, usando el modelo propuesto se puede calcular el $Rd(\lambda)$ para el acrílico y el gouache (Figura 3.22). El comportamiento sigue el criterio comentado, siendo

las *muestras* al óleo utilizadas un material más sensible a la irradiancia, que las *muestras* de acrílico y gouache.

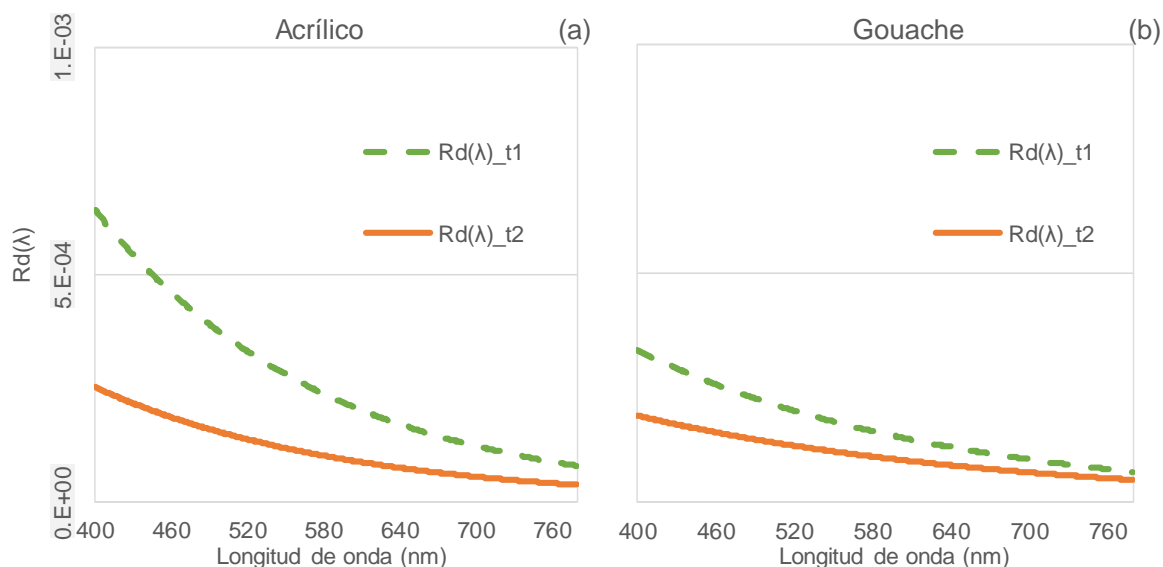


Figura 3.22 Comportamientos espectrales de daño relativo Rd para materiales Acrílicos (a) y Gouache (b), con un iluminante tipo *led*, para dos tiempos de envejecimiento, t_1 y t_2 .

El avance presentado en este trabajo ha sido el desarrollo de un modelo espectral de daño, $Rd(\lambda)$, así como su variación temporal, que tiene en cuenta las características espectrales de cada material usado ($b(\lambda)$). El estudio, puede contribuir en la definición de las características espectrales de un iluminante optimizado, que permite la cuantificación de cómo una distribución espectral característica produce el envejecimiento de una pintura con el tiempo. Los datos obtenidos, proporcionan valores que sirven para determinar el tipo de iluminante más adecuado para cada tipo de material.

Mediante la ecuación,

$$Rd_{iluminante} = \frac{\sum Rd(\lambda) E(\lambda)}{E_{iluminante}}, \quad (3.28)$$

se logra el valor del daño relativo Rd , de las fuentes luminosas usadas habitualmente para iluminar el patrimonio. Si se aplica a un *iluminante A* (lámpara de tungsteno) con una iluminación media de 100 lx si la irradiancia equivalente es $X_{t1} = 9$ y $X_{t2} = 10$, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Valores de Rd con el modelo propuesto en una habitación iluminada con un iluminante A de 100 lx. Los valores de b se obtienen con el modelo propuesto, para dos tiempos de envejecimiento $t1$ y $t2$ correspondiente a $X_{t1} = 9$ y $X_{t2} = 10$ respectivamente, para las pinturas al óleo, acrílicos y gouache.

<i>Iluminantes</i>	<i>Muestras</i>	<i>X</i>	<i>Hdm</i> (Whm ⁻²)	<i>Rd(λ)</i> (m ² W ⁻¹ h ⁻¹)	<i>b</i> (modelo)	<i>Rd</i> (m ² W ⁻¹ h ⁻¹)
<i>Iluminante A</i>	Óleo	$X_{t1=9}$	8103	9.10E-04	0.0074	2.51E-04
		$X_{t2=10}$	22026	3.32E-04	0.0062	1.08E-04
	Acrílico	$X_{t1=9}$	8103	4.95E-04	0.0055	1.82E-04
		$X_{t2=10}$	22026	1.99E-04	0.005	7.84E-05
	Gouache	$X_{t1=9}$	8103	2.73E-04	0.0042	1.24E-04
		$X_{t2=10}$	22026	1.61E-04	0.0035	7.31E-05

3.14.6. Consideraciones futuras

Dos aspectos de este estudio que pueden ser origen de futuras investigaciones son:

- Determinar el comportamiento del parámetro b con diferentes materiales, con períodos más prolongados de exposición a la luz.

- Controlar el efecto fotoquímico mediante el proceso secundario de extinción o quenching que se produce en los procesos químicos ^[130,131]. Estudiar como la reducción en el tiempo de vida de un estado excitado puede servir para minimizar el efecto fotoquímico en las exposiciones, debido a que la extinción puede ser un proceso deseado o una reacción secundaria no deseada que puede disminuir el rendimiento cuántico de la acción fotoquímico. Existen elementos apagadores (s, Q) que son una vía adicional para la desactivación del estado excitado (M^*). Estos elementos serían muy interesantes para su uso en la conservación preventiva.

Capítulo 4

La Iluminación Natural aplicada en el patrimonio cultural

4. *La Iluminación Natural aplicada en el patrimonio cultural*

Resumen

En este capítulo, se lleva a cabo una investigación donde, además de señalar los beneficios de usar la *luz natural* como sistema de iluminación en el patrimonio cultural, se desarrolla un método que cuantifica y minimiza los inconvenientes de utilizarla como iluminante debido sobre todo a su variabilidad. El método, propone elementos que ayudan a controlar estos inconvenientes en espacios en los que se expongan obras del patrimonio cultural. Como se ha descrito en el *Capítulo 3*, la exposición de ciertos materiales a la radiación visible, produce un efecto fotoquímico que se asocia con el envejecimiento o el daño en los mismos, por pérdida de color y otros efectos no deseados. El objetivo principal de la investigación, ha sido, el desarrollo de un método, que cuantifica la exposición radiante efectiva de la *luz natural*, teniendo en cuenta la distribución espectral de la misma en el espacio y en el tiempo, que permite, además, obtener el valor del daño que produce este tipo de iluminación sobre las obras expuestas. Para la implementación del método se ha estructurado el problema en cuatro fases diferentes, en cada una de las cuales, se aplica un modelo de trabajo diferente, que recoge las principales variables que son propias de este tipo de iluminación. El primero, es un modelo

geométrico y fotométrico que proporciona las características arquitectónicas y los valores de iluminancia del espacio estudiado. El segundo, es un modelo espectral de la *luz natural* que proporciona, en función de la longitud de onda, la irradiancia recibida en el espacio estudiado, a lo largo del tiempo y en función de las condiciones meteorológicas. El tercero, es un modelo que estima el valor de daño según los criterios de conservación establecidos. Y el cuarto, es un modelo meteorológico estadístico de la zona donde se encuentra el espacio estudiado, en el que se recogen, sus características climatológicas diarias. Todos ellos, finalmente se relacionan entre sí, obteniendo el daño detallado que produce la *luz natural* sobre el material expuesto, dependiente de las características lumínicas del lugar de exposición estudiado en tiempo, espacio, clima y tipo de radiación.

La investigación, se ha desarrollado y analizado en la exposición permanente de pinturas al óleo del claustro del siglo XV del Monasterio de Santa María de El Pualar (Figura 4.1), las cuales fueron concebidas por el pintor Vicente Carducho para ser contempladas con *luz natural*.



Figura 4.1 Vista aérea del complejo del Monasterio de El Pualar en Rascafría (Madrid). (Google Maps).

Objetivos Específicos

- i. Generar un sistema que permita la valoración espacio/temporal precisa de los riesgos que implica la utilización de la *luz natural*, en museos y en exposiciones de obras de arte. La valoración, usará los criterios de daño dados por las normas de conservación para iluminantes de luz artificial.
- ii. Estudiar cómo es posible complementar o sustituir la luz artificial por *luz natural*, sobre todo en exposiciones donde la *luz natural* es un complemento de la propia obra.
- iii. Aprovechar las posibilidades de ahorro energético que supone el uso de la *luz natural*, al ser una energía ecológica y renovable.
- iv. Proporcionar una herramienta sencilla de análisis y cálculo, que permita conocer el comportamiento de la iluminación natural en espacios expositivos.

4.1. Preliminares

En este capítulo, y continuando con el concepto descrito en el *Capítulo 1* sobre “Conservación Preventiva”, se presenta un estudio que propone, una herramienta para minimizar el daño en las obras de arte que estén iluminadas con *luz natural*.

La investigación desarrollada en este capítulo, se ha llevado a cabo en el claustro del Monasterio de Santa María de El Pular, donde se encuentra una exposición permanente de 54 óleos sobre lienzo, realizados en el siglo XVII por Vicente Carducho, pintor español de origen italiano, (Figura 4.2). El artista realizó la obra para ser expuesta en este espacio, y con la intención de que fuera iluminada con la *luz natural* del claustro, que contribuía al dramatismo de la misma.

En la descripción del monasterio, se documenta, que entre los años 1629 a 1632 Carducho pintó, por encargo del prior Juan Baeza, un ciclo de 56 cuadros al óleo sobre la vida de San Bruno de Colonia y sobre la historia de la orden cartujana para el claustro de la cartuja de El Pular, que se encuentra situada en un valle de la sierra al norte de Madrid.

Por su tamaño (3,45 x 3,15 metros), y por el número de pinturas (56) fue el mayor ciclo de cuadros que se ha llegado a realizar. Vicente Carducho fue pintor del rey, por lo que resulta equiparable en prestigio a Diego Velázquez, coetáneo y colega suyo.



Figura 4.2 Pasillo del Claustro del Monasterio de Santa María de El Paular, se aprecia como las obras se iluminan con *lux natural*. Detalle durante el periodo de la restauración arquitectónica.

En la obra, Carducho compone la historia sabiamente, los personajes adoptan las actitudes más adecuadas, el conjunto produce una impresión de monumentalidad y equilibrio un tanto vacío, a veces, pero siempre grato. Narra las historias, como los temas de martirio sin poner especial énfasis en subrayar la nota fuerte de la tragedia, y tampoco sobresale la expresión mística de sus personajes.

Carducho realizó este encargo en su taller de la calle de Atocha, y entregaba los cuadros en la Hospedería del Paular. Por el conjunto de su trabajo le pagaron la suma de ciento treinta mil reales.

Entre tan copiosa serie, se mencionan como los más notables cuadros: "Entrevista del Papa y S. Bruno", "Muerte del Venerable Odón de Novora", "S. Bruno renunciando a la mitra de Regio", "Dom Bosson, General de la Orden, resucita a un albañil muerto", "La virgen de los Cartujos", "La humildad de San Hugo", "S. Dionisio cartujano", "Martirio de monjes y conversos de la cartuja de Londres", "S. Hugo toma el hábito de cartujo", "Muerte del padre Laudino en la cárcel", "Aparición de la Virgen a S. Juan Fort", "Aparición del padre Basilio de Borgoña a S. Hugo de Linconln, su discípulo", "El milagro de las aguas.

A poco de producirse la desamortización de Mendizábal en el siglo XIX, estos cuadros fueron presas de los desamortizadores, pasando en 1836 al efímero Museo de la Trinidad, y en 1870 al Museo del Prado, donde permanecieron almacenados hasta 1896, en que se inició el saldo de los mismos, repartiéndose por diversas provincias sin ningún criterio. Al Museo del Prado fueron destinados dieciséis óleos, catorce a la Escuela de Bellas Artes de la Coruña, siete a la catedral de Córdoba, seis al Palacio Arzobispal de Valladolid y los demás repartidos en los siguientes lugares: Monasterio de Poblet, cartuja de Miraflores, Museo Municipal de Poblet, Palacio episcopal de Jaca, Museo de Zamora y Universidad de Sevilla. Finalmente, excepto dos que desaparecieron

en la guerra civil española, el resto fueron recuperados por el Museo del Prado para restaurarlos y exponerlos en el claustro del Monasterio de Santa María de El Pualar, lugar para el que fueron creados.

4.1.1. La luz natural en el patrimonio cultural

En este punto se va a realizar una revisión sobre los avances, criterios, requisitos, conveniencia, e incluso a veces la necesidad imperiosa del uso de la *luz natural* en la iluminación del patrimonio cultural. Además, se consideran y ponderan sus aspectos negativos, el riesgo e inconvenientes que dicho uso implica, y las medidas tomadas para evitar estos aspectos y mejorar su uso.

4.1.2. Ventajas del uso de la *luz natural*

Diferentes autores, entre ellos Pattini ^[132] que consideran, que la *luz natural* es una alternativa válida para la iluminación de interiores, porque es una fuente de energía ecológica y renovable que puede implicar un ahorro considerable. Además, la radiación solar introduce menos calor por lumen que la mayoría de fuentes de iluminación eléctrica. Chirarattananon, et al. en 2002 ^[133] y Krarti, et al. en 2005 ^[134], recomiendan el uso de *luz natural* en la medida de lo posible, ya que el alumbrado artificial es uno de los principales elementos que consumen electricidad en muchos edificios no domésticos, que estiman aproximadamente entre 20 – 30% de la carga total de energía del edificio.

Por otra parte, Roche en 2000 ^[135] Galasiu en 2006 ^[136] y Cheung en 2008 ^[137] indican que las personas manifiestan una preferencia por la iluminación natural en sus entornos, en lugar de la artificial. Ésta influye de forma positiva en la sensación de claridad y de brillo. Defienden que la iluminación natural es eficaz y estratégica para el desarrollo sostenible, además de mejorar el confort visual, y este tipo de iluminación destaca por su eficiencia energética y la evolución que supone en un tipo de construcción ecológica. Las ventanas proporcionan una doble función, transmiten la luz creando un ambiente agradable y permiten a las personas mantener contacto visual con el mundo exterior. Consideran que la *luz natural* es el mejor sistema de iluminación para la reproducción cromática y su calidad hace que sea la fuente que más se acerca a la respuesta visual humana.

Navvad en 1993 observó, que entre los conservadores existía una demanda de museos sin ventanas y el uso de luz artificial como sistema de iluminación. Navvad destacó los aspectos beneficiosos de la *luz natural* que empujaban a un interés creciente por parte de arquitectos, diseñadores de iluminación y el mundo del arte en general, para incorporarla como alumbrado de edificios y exposiciones ^[138].

Además de los beneficios descritos para la *luz natural*, en muchas ocasiones, es una parte intrínseca de la obra artística expuesta. La

luz natural no sólo proporciona calor, sino que también muestra la intensidad de color, de una manera que la luz artificial no puede imitar de forma eficiente. En el caso estudiado en este trabajo, la *luz natural* también forma parte del contexto en el que las obras de arte fueron concebidas y percibidas originalmente. Hay que tener en cuenta que el espacio expositivo, en el que se exhiben las obras es, a su vez, un espacio ligado íntimamente a la *luz natural*, ya que se trata de un claustro gótico en el que la iluminación natural se convierte en parte activa de la obra. Balocco, et al. en 2008 ^[139] y Mayorga, et al. en 2015 ^[87] presentan dos investigaciones donde se aplica la *luz natural* en este tipo de espacios, proponiendo herramientas que mantienen un equilibrio entre el daño que puede producir ésta sobre la obra y la exposición a la misma.

4.1.3. Consideraciones para iluminar espacios interiores expositivos con luz natural

Navvad en 1998 ^[140] expone, que los primeros intentos de iluminar con *luz natural* en museos se basaron en el método ensayo y error. Propone realizar una evaluación sobre la comodidad visual y la eficiencia energética, para lo que se requiere una estimación precisa de la cantidad de *luz natural* en cualquier punto interior del espacio a iluminar. Esta estimación debe ser realizada por los diseñadores de la iluminación al comienzo del proceso previo a la

instalación y uso de cualquier sistema de alumbrado, considerando los siguientes factores:

- a. la cantidad de luz y su intensidad;
- b. la duración de la exposición; y
- c. las características espectrales de la luz del día.

Convencionalmente, estos factores se obtienen mediante los modelos descritos por la CIE ^[141,142], que tienen en cuenta la distribución de la luminancia del cielo con respecto al cénit y las variaciones dinámicas de la iluminancia de la luz del día a medida que cambian las condiciones del sol relacionadas con su posición en el firmamento ^[143]. En el cálculo también ha sido incluido el factor del clima para conocer las condiciones de tres tipos de cielo que están considerados en la CIE ^[142]; despejado, cubierto o nublado.

Tregenza ^[144] en su investigación de 1983 determina que, cuando se quiere conocer con exactitud la iluminancia de la *luz natural* en un espacio interior, no es suficiente con realizar medidas simultáneas reales de la *luz natural* con diferentes tipos de cielo, ya que la relación de la iluminancia interna con respecto a la externa varía en cierta medida. Este error se puede considerar que está dentro de los límites tolerables, como se ha comprobado en diseños de iluminación de mucho éxito que se basan sólo en cálculos que no

estiman esta variación. En el caso de la investigación desarrollada en este capítulo, no se ha tenido en cuenta el ajuste propuesto por Tregenza.

4.1.4. Control del daño que produce la luz natural

Cuando se irradia con *luz natural* no todo son ventajas, ya que ésta puede ser más perjudicial que la luz artificial, sobre todo para los materiales sensibles [79,95,138,145]. Los métodos que se proponen en este capítulo, van a controlar las desventajas que la *luz natural* presenta para poder alumbrar de manera segura. La diferencia entre los dos tipos de iluminación se debe principalmente a la dificultad de controlar la variabilidad de la *luz natural*, esto es, sus cambios a lo largo del día, del clima, de la época del año y de su composición espectral [146].

Hasta la fecha, el control de la radiación luminosa en museos se basa en el establecimiento de ciertas normas y recomendaciones, como las recogidas en la CIE 157:2004 [79] y en IESNA [95]. Estas normas sugieren que, para controlar el daño producido por la iluminación en las exposiciones se prescinda en lo posible de la *luz natural*, y se use preferentemente la luz artificial. Las recomendaciones establecen ciertos criterios de control, para que el daño producido en las exposiciones por la radiación visible sea el mínimo posible. La *luz natural* debe ser convenientemente limitada y/o controlada debido a que, a lo largo del día, del mes y

dependiendo del clima, evoluciona con un comportamiento diferente para cada caso [139].

En la investigación que se presenta a continuación, se hace una valoración cuantitativa sobre el perjuicio que la *luz natural* puede causar a las pinturas expuestas, y se proponen medidas para que éste sea el menor posible. En el caso estudiado, la fuente de iluminación óptima es la *luz natural*, debido al tipo de construcción, a que fue el tipo de iluminante utilizado para su creación y al interés artístico, y por ello, es conveniente no renunciar a su uso como sugieren las recomendaciones con respecto a este tipo de alumbrado [145].

Hasta el momento, la estrategia en el campo de la conservación preventiva de los monumentos del patrimonio cultural se basa, en la elaboración de ciertas normas y recomendaciones para llegar a un compromiso entre dos aspectos, la conservación y la exhibición [146]. Aun así, se entiende que esta estrategia está lejos de la perfección:

- Desde el punto de vista de la exposición las restricciones relativas a los niveles de luminancia y la calidad de la percepción cromática y estética son, a menudo, obstáculos insuperables.
- Desde el punto de vista de la conservación y de los requisitos estéticos, con frecuencia arbitraria, se diseñan y desarrollan proyectos de iluminación que pueden resultar peligrosos para la preservación de objetos.

De todos modos, esta situación depende de los recursos técnicos proporcionados por la industria especializada que, en algunas ocasiones, no satisfacen a todos los implicados y que, con frecuencia, provocan excesos de una manera u otra.

Existen estudios, relativos a espacios iluminados con *luz natural* que siguen estos criterios de conservación, que proponen métodos para evaluar, utilizar y controlar este tipo de alumbrado, o en su defecto para evitar que puedan producir daños en las obras expuestas [109,139,147-150].

La investigación descrita en este capítulo, resuelve el valor de daño en un intervalo de tiempo específico, normalmente anual, y en una posición espacial concreta, provocado por la *luz natural*, y propone un criterio para buscar el equilibrio entre conservación y exposición, con unos criterios que en las investigaciones realizadas hasta la fecha no se habían contemplado.

4.1.5. Acondicionamiento previo del espacio expositivo

El Instituto del Patrimonio Cultural de España (Ministerio de Cultura), entre los años 2007 y 2011, puso en marcha un proyecto para acondicionar el claustro y restaurar las pinturas expuestas en el Monasterio de Santa María de El Pualar. El objetivo de la rehabilitación del claustro, era abrir una exposición permanente con los óleos, que habían sido retirados años atrás de ese lugar debido

a su deterioro. La recuperación de los óleos fue llevada a cabo por los conservadores y restauradores del Museo del Prado. Una vez conseguido el propósito de restauración, la exposición está abierta al público desde 2011.

En la rehabilitación del claustro en los años citados, se tomaron decisiones encaminadas hacia la conservación preventiva, con las siguientes acciones:

- el control de la temperatura,
- la regulación de la humedad,
- el control de la *luz natural*.

Los óleos se encuentran ubicados en las paredes del interior del claustro, enfrente de las ventanas a través de las cuales se ilumina con la *luz natural*.

Para el control de la *luz natural*, se cerraron parte de las ventanas con paramentos y se instalaron filtros en los cristales con el fin de reducir la irradiancia incidente de la luz visible sobre las pinturas (Figura 4.3). Los filtros eliminaban la radiación UV (valores de UV menores al 1%), y limitaban la radiación visible en el porcentaje requerido para cada orientación cardinal (las características de cada filtro se describen por el fabricante en la Tabla 4.1).

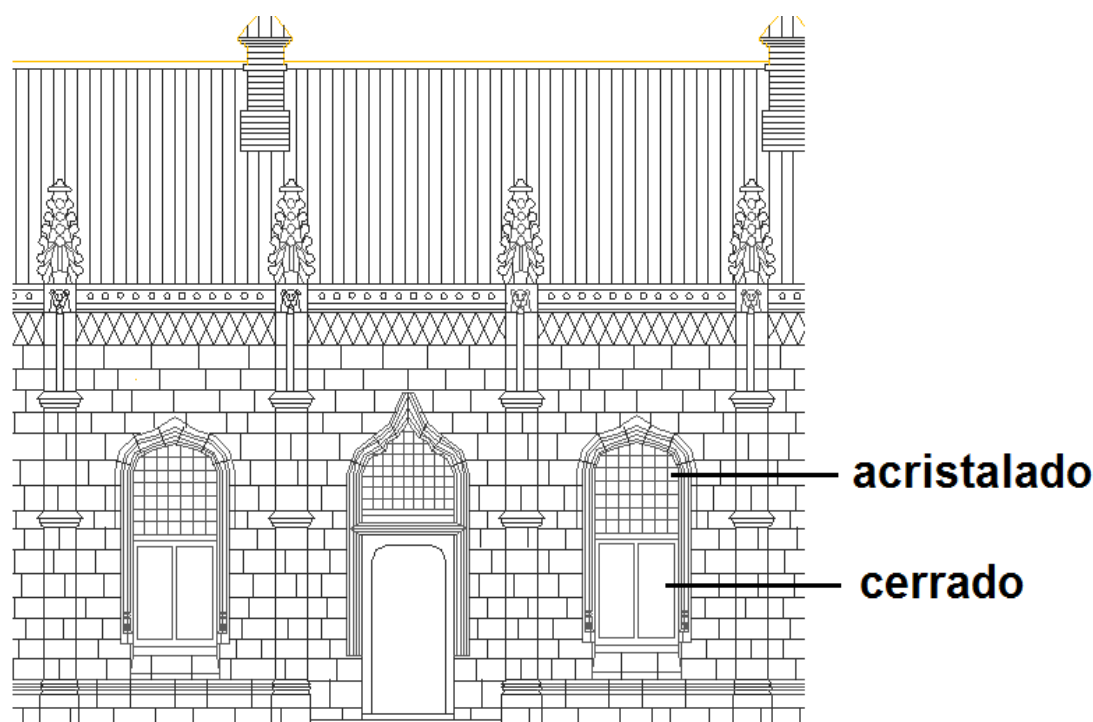


Figura 4.3 Ventanales del claustro, en la zona señalada como acristalado se han añadido los filtros.

Para comprobar que los filtros cumplían los requisitos, se instalaron sensores de luz (luxómetros) en el claustro (*Lux – Bug Hanwell*, longitud de onda visible, $400 - 700\text{ nm}$, precisión, $\pm 1\%$, precisión UV, $\pm 1\%$), con los que se han tomado registros de la iluminancia y de la radiación UV, realizando una medida cada 15 minutos, las 24 horas desde el año 2009. Los sensores se colocaron a una altura de $3,67\text{ m}$ medida desde el suelo del claustro. Esta posición fue elegida porque es el área hasta donde la *luz natural* afecta más a las pinturas. Por encima de esta altura la radiación directa no es significativa, al no llegar a incidir en las zonas donde están ubicados los óleos. Al mismo tiempo, esta posición de los sensores ayuda a que las medidas no tengan interacciones con los visitantes, (Figura 4.4).



Figura 4.4 Situación de los sensores (Luxómetros) colocados en el claustro. La flecha sobre el plano indica la posición del medidor en la pared del claustro.

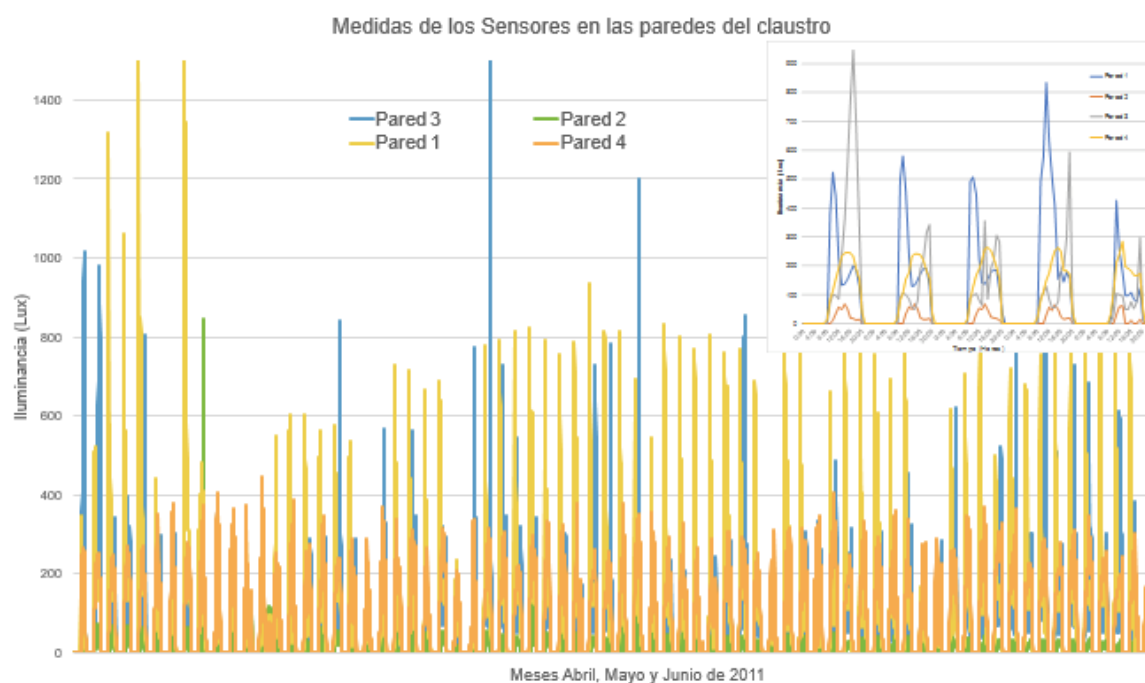


Figura 4.5 Mediciones de iluminancia en lux, tomadas con los sensores de las cuatro paredes del claustro, en los meses de abril a junio de 2011. El detalle superior derecho muestra las iluminancias medidas a lo largo de cinco días del mes de abril de 2011.

En la Figura 4.5 se muestran los valores obtenidos a partir de las medidas realizadas a lo largo de tres meses durante el año 2011. En el ejemplo se puede observar la gran variabilidad diaria de la iluminancia, lo que pone de manifiesto la necesidad de la

caracterización de la *luz natural* en espacio y tiempo en los lugares que se pretenda usar este tipo de iluminación.

Las transmitancias (T) de los cristales con filtros se diferencian de acuerdo con la orientación cardinal de cada pared (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Características de los vidrios con filtros colocados en las ventanas del claustro.

<i>Orientación</i>	<i>Tipo de Vidrio</i>	<i>T Visible (%)</i>	<i>T UV (%)</i>	<i>Características</i>
Pared 1	VIMAT	57	<1	SGGCLIMALIT PLUS: Vidrio exterior SGGSTADIP6.5 1 PVB SGGPLANILUX/ translucido VIMAT. Cámara de aire 12mm. Vidrio interior PLANILUX/ translucido VIMAT 5mm.
Pared 2	ST-120	13	<1	SGGCLIMALIT PLUS: Vidrio exterior SGGSTADIP6.5 1 PVB SGGCOOL-LITE(ST)/ translucido VIMAT. Cámara de Aire 12mm. Vidrio interior PLANILUX/ translucido VIMAT 5mm.
Pared 3	ST-136	24	<1	
Pared 4	ST-167	43	<1	

En el desarrollo del capítulo, a la hora de referirse a las paredes del claustro se las ha identificado con una numeración en el orden que se muestra en la Figura 4.6, ya que la orientación del claustro no sigue los puntos cardinales exactos, y hace complicado citarlas de ese modo. Como ejemplo, la luz que reciben los cuadros en las primeras horas del día incide principalmente sobre los situados en la pared 1 y parte de la 2, y la luz de la tarde sobre la pared 3 y parte de la 4, lo que complica referirse a estas posiciones de modo cardinal.

Como medida complementaria al acondicionamiento del claustro, el Instituto de Patrimonio Cultural solicitó a la Universidad Complutense de Madrid (UCM), que realizara una investigación para

cuantificar la cantidad de radiación que reciben las obras expuestas y el daño equivalente que supone en las mismas. Para obtener el valor de daño de la *luz natural* se comparó con los iluminantes tipo recomendados para pinturas al óleo exhibidos en museos, recogidos en la norma CIE [79].

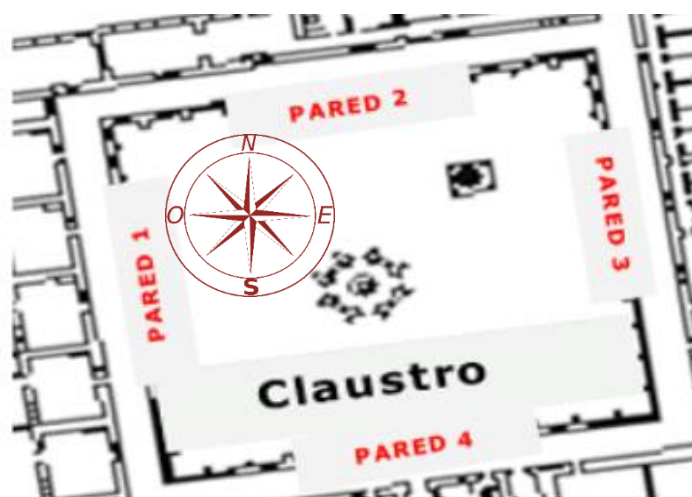


Figura 4.6 Numeración para identificar las paredes del claustro. Colocación de las paredes del claustro con respecto a su referencia cardinal.

Esta colaboración permitió, a los gestores y restauradores del Museo del Prado, planificar con datos objetivos, los lugares y las fechas óptimas en las que podrían estar expuestos los cuadros.

En la investigación, se evalúa si la *luz natural* puede servir como iluminación permanente en el patrimonio cultural. Este aspecto se cumplirá si los valores de daño obtenidos se adaptan a las recomendaciones que estiman la cantidad óptima de exposición a la radiación en óleos [71,79,90]. Los resultados obtenidos en este trabajo no siempre cumplen con estas advertencias, por ello se formulan

medidas preventivas para las ocasiones en las que la cantidad de radiación está fuera de la norma.

Para el caso particular del claustro de Santa María de El Paular, se han creado un conjunto de modelos, que ofrecen una medida realista de los efectos de la *luz natural* en los óleos expuestos.

En estos modelos, se caracteriza la composición espectral de la luz y su intensidad. El cálculo incluye una estimación completa y precisa de las variaciones en el tiempo y en el espacio, considerando la ubicación geográfica del claustro. En el cálculo del daño, también se ha analizado la influencia de la respuesta espectral de las pinturas al óleo (material utilizado en las obras), descrito en el modelo de Berlín ^[70,121]. Los resultados obtenidos se utilizaron para evaluar, si el daño producido en la exposición es conforme a los criterios de conservación propuestos por el equipo restaurador.

El método desarrollado en este trabajo, permite determinar las condiciones apropiadas para el uso de la *luz natural*, ya sea como una fuente de iluminación primaria o secundaria.

4.2. *Aplicación de la Iluminación Natural en patrimonio cultural en el claustro del Monasterio de El Paular*

En esta investigación se han se han considerado:

- las variables particulares espectrales y temporales, propias del tipo de la iluminación Natural, y

- las variables del entorno que modifican el comportamiento de la misma, como son los materiales de las obras expuestas para las que se calcula el daño que produce en ellas este tipo de luz, y las características geométricas y arquitectónicas del claustro, considerando su ubicación y las condiciones climáticas.

A partir de esto se han desarrollado tres modelos, representados en el diagrama de la Figura 4.7:

- a. Modelo geométrico-fotométrico.
- b. Modelo espectral de la *luz natural*.
- c. Modelo de daño espectral.

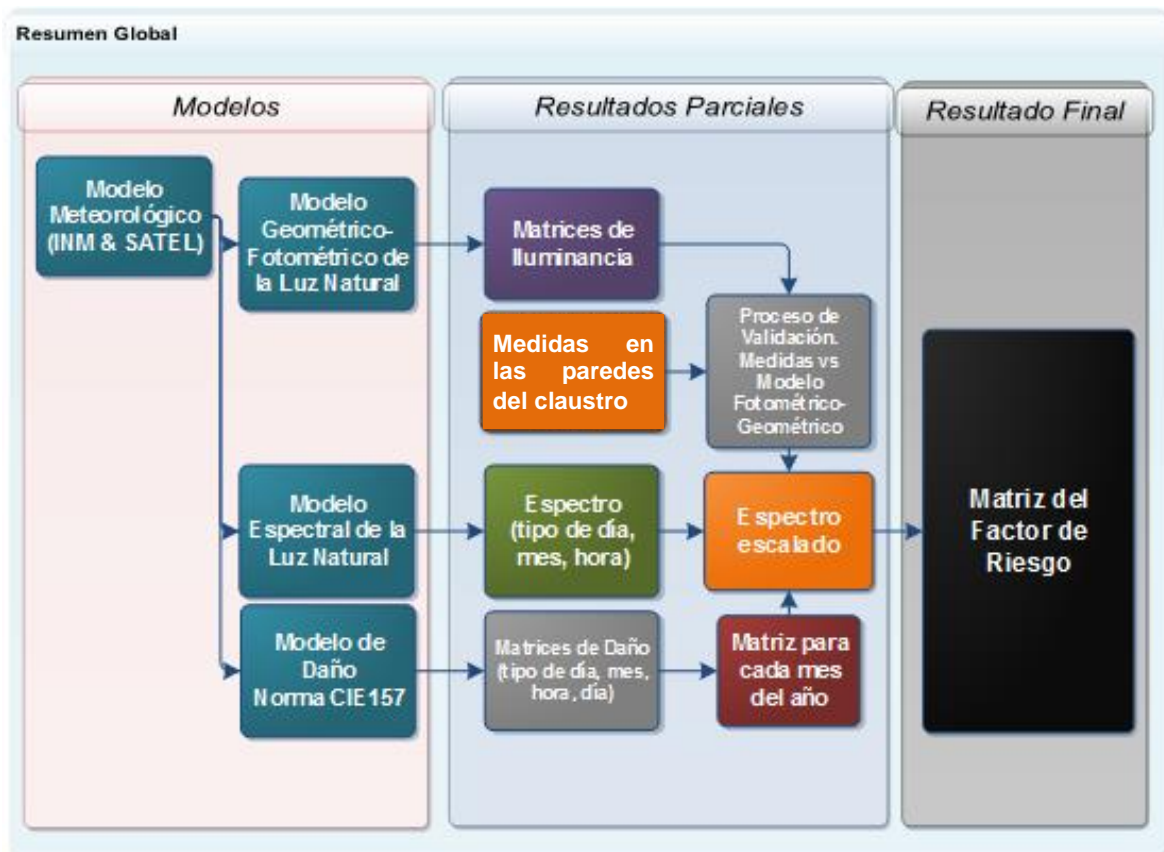


Figura 4.7 Diagrama de flujo de los modelos implementados para obtener la matriz del factor de daño. Esquema general de cada modelo.

Por último, se ha utilizado un modelo meteorológico, que es un criterio común para los tres enumerados anteriormente. Debido a que la *luz natural* es directamente dependiente del clima, se deben considerar aspectos estadísticos de la zona estudiada como referencia, usando valores ofrecidos por agencias especializadas [151,152].

A continuación, se describen los procesos realizados en el desarrollo de cada modelo.

4.2.1. Modelo Geométrico-Fotométrico

Mediante este modelo se han obtenido las iluminancias del claustro (F_{fot}) en lux para cada hora y cada día a lo largo de un año.

En la Figura 4.8, se representa un diagrama con los diferentes procesos realizados.



Figura 4.8 Diagrama con el proceso para generar las matrices de iluminancia en el claustro del Monasterio de Santa María de El Pualar.

La técnica empleada permite, mediante la simulación de la *luz natural* del entorno estudiado, obtener la cantidad de iluminancia en

cada punto del claustro. El intervalo temporal tomado para el valor de iluminancia de cada punto es de una hora.

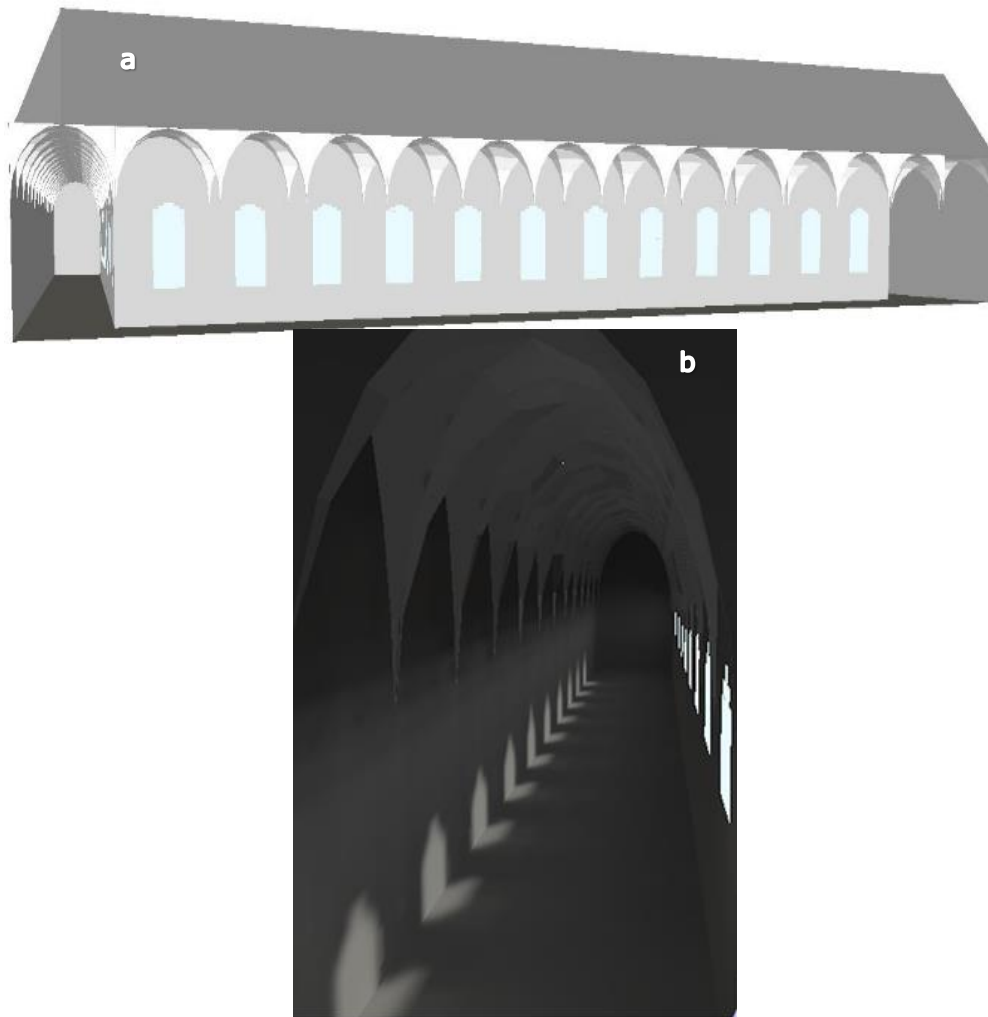


Figura 4.9. a) Detalles del diseño geométrico del claustro del Monasterio. b) Simulación fotométrica de la luz natural en un día despejado de un pasillo del claustro del Monasterio.

La simulación de la iluminación del claustro (valores fotométricos) se ha realizado con software específico (DIALux ^[153]); y los elementos de construcción y el plano en 3D, (valores geométricos) con AutoCAD, considerando, en ambos casos, los parámetros de los elementos del claustro, que describen su comportamiento desde el punto de vista óptico, como la reflexión, la transmisión y la

absorción. En los ejemplos de la Figura 4.9 se muestran los aspectos geométricos y fotométricos.

De los datos recogidos en el modelo fotométrico, se toman las iluminancias que afectan directamente a los óleos, que son las obtenidas en los lugares de las paredes donde se ubican éstos, teniendo en cuenta las variables del entorno y de la *luz natural*.

Para procesar el modelo se han considerado los siguientes aspectos:

- La iluminancia debida a la *luz natural* que entra en el claustro a través de las ventanas, hasta las paredes donde se encuentran los óleos. Ésta depende de la orientación cardinal y de los filtros de cada ventana.
- Los tipos de día de acuerdo con el clima. Se han considerado las tres clases de día establecidos por la norma CIE ^[142]
 - día claro (A; no hay nubes en el cielo),
 - día nuboso (B, cielo parcialmente cubierto), y
 - día cubierto (C, cielo totalmente cubierto por nubes).
- Los porcentajes de cada tipo de día se han extraído de los datos proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología AEMET en Rascafría (Madrid).
- Las tipos de radiación: directa y/o difusa.
- La temporalidad: la investigación se realizó desde enero a junio, utilizando las cantidades de iluminancia equivalente de

los días 7 y 21 de cada mes, para cada hora del día, desde el amanecer hasta la puesta del sol. Para obtener los valores desde julio a diciembre se han considerado cantidades simétricas a las calculadas desde enero a junio, una aproximación suficiente dentro de los márgenes de iluminancia utilizados.

- Los coeficientes de reflexión de las superficies del claustro. Los valores se comprobaron con un espectrofotómetro *EPP2000 Net Stellar* (intervalo de exploración: 200 a 1100 nm, resolución de 1 nm), el resultado medio fue de un 20% para el suelo, un 70% para el techo y un 50% para las paredes.

El interés de la investigación, se centra principalmente en las cuatro paredes verticales donde se exponen los óleos. Las dimensiones de cada pared son de 53 m en horizontal por 6,6 m en vertical, aproximadamente. Para el cálculo del modelo se ha construido una matriz de puntos de 200 x 30 (horizontal, vertical) para cada pared, donde a cada punto de la matriz le corresponde un valor de iluminancia. Los puntos representados en la matriz tienen, por tanto, una separación equidistante de 0,26 x 0,22 m (horizontal, vertical). Estas cantidades se han obtenido mediante la simulación del modelo fotométrico. La cantidad de muestra tomada (número de puntos de la matriz de iluminancias) se considera lo suficientemente

extensa para conseguir el objetivo de la investigación y los requisitos computacionales para su cálculo son moderados.

Con el fin de verificar los valores del modelo fotométrico, se compararon con las medidas de iluminancia del claustro realizadas con los sensores colocados en el paramento vertical de las paredes. La comparación entre ambos se muestra en el apartado 4.3.2.

4.2.2. Modelo espectral de Iluminación Natural

Con este modelo se han calculado los valores de irradiancia $E(\lambda)$, en $Wm^{-2} nm^{-1}$. Considerado las características espectrales de la *luz natural* que hay en Rascafría (Madrid) (Figura 4.10), según las características atmosféricas y las condiciones del cielo donde está ubicado el claustro, a lo largo del año y para cada hora.

Los valores de irradiancia espectral del sol obtenidos, se calculan de acuerdo con los modelos atmosféricos de referencia [154,155]. En el cálculo se ha utilizado la ecuación (4.1),

$$E(\lambda) = E_D(\lambda) + E_r(\lambda), \quad (4.1)$$

donde $E_D(\lambda)$ es la irradiancia directa en $Wm^{-2} nm^{-1}$ y $E_r(\lambda)$ la irradiancia difusa en $Wm^{-2} nm^{-1}$.

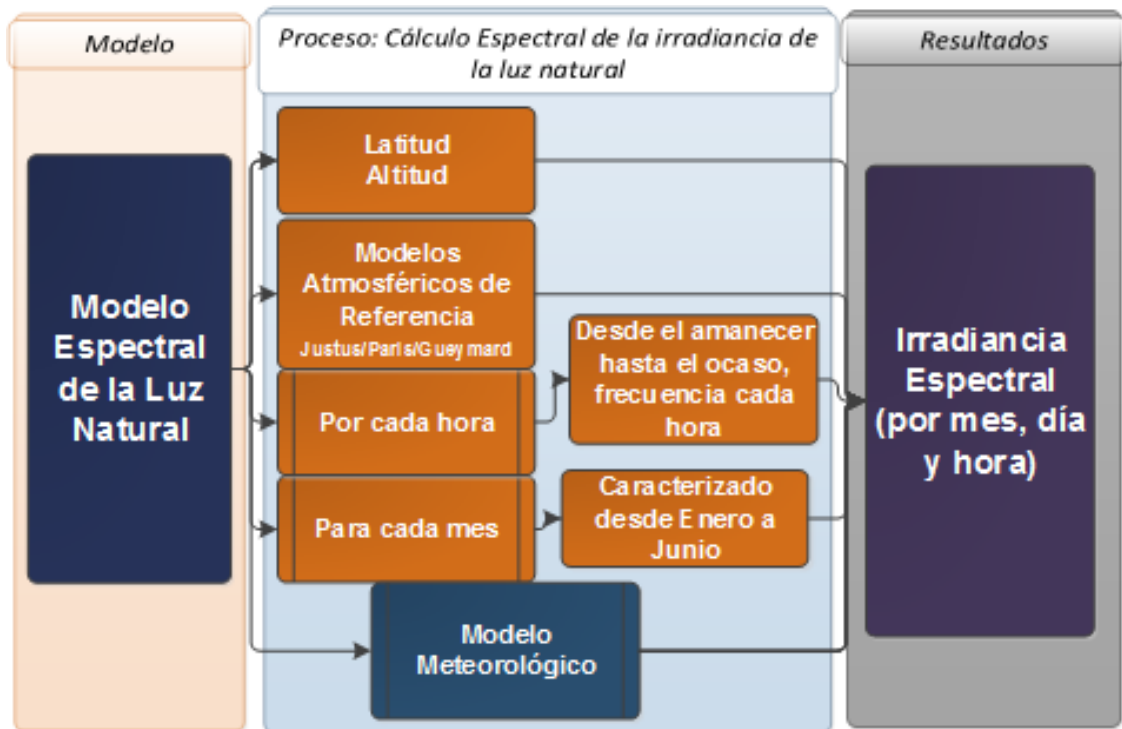


Figura 4.10 Diagrama del modelo espectral de la iluminación natural.

Los modelos atmosféricos utilizados en la investigación tienen en cuenta la latitud y la longitud geográficas, la altura sobre el nivel del mar, la orientación cardinal y los factores de la atmósfera que influyen en la radiación solar.

El cálculo para determinar la posición del sol, tanto en altura como su azimut a lo largo del año, se ha obtenido mediante el método descrito por Myers ^[156], considerando la zona donde se encuentra el Monasterio, cuya latitud es 40.9º N y su longitud 3.7º W.

Para completar el modelo espectral se han considerado las variables descritas en el geométrico-fotométrico, como es el tipo de día (A, B, C), y los aspectos temporales (mes y hora del día).

4.2.3. Modelo de Daño espectral

El desarrollo de este modelo se ha realizado usando las referencias proporcionadas por la CIE 157 ^[79] que describen el alcance del efecto fotoquímico que produce la luz visible, y las ecuaciones que calculan el daño producido en materiales de exposiciones que son sensibles a la luz.

Con el modelo se han obtenido los valores de exposición radiante efectiva H_{dm} para cada punto de las paredes del claustro, en Whm^{-2} . Este valor indica la cantidad de radiación recibida por un material, en el caso estudiado el óleo caracterizado por la norma CIE 157, lo que permite conocer el deterioro que H_{dm} supone para él y por tanto medir su sensibilidad.

Las matrices que detallan la exposición radiante efectiva de cada pared, que aparece como función de daño en el diagrama de la Figura 4.11, se derivan a partir de las matrices de iluminancia e irradiancia calculadas descritas en los apartados 4.2.1 y 4.2.2 y con el proceso explicado en la Figura 4.11. Conociendo el espectro de la *luz natural* y el valor de irradiancia, se han obtenido las cantidades del daño según el modelo Berlín ^[121], en forma de matrices de cada punto y para cada pared.

Aplicando los criterios del modelo Berlín, vistos en el *Capítulo 3* y adaptado a la *luz natural*, con la ecuación

$$H_{dm}(t) = \int_t E_{il,rel}(\lambda) s(\lambda)_{dm,rel} dt, \quad (4.2)$$

se obtiene la exposición de irradiancia efectiva H_{dm} , cuyo umbral que produce un cambio de color de $\Delta E_{ab}^* = 1$ viene determinado por el tiempo t_s , y su magnitud se identifica con $H_{s,dm}$.

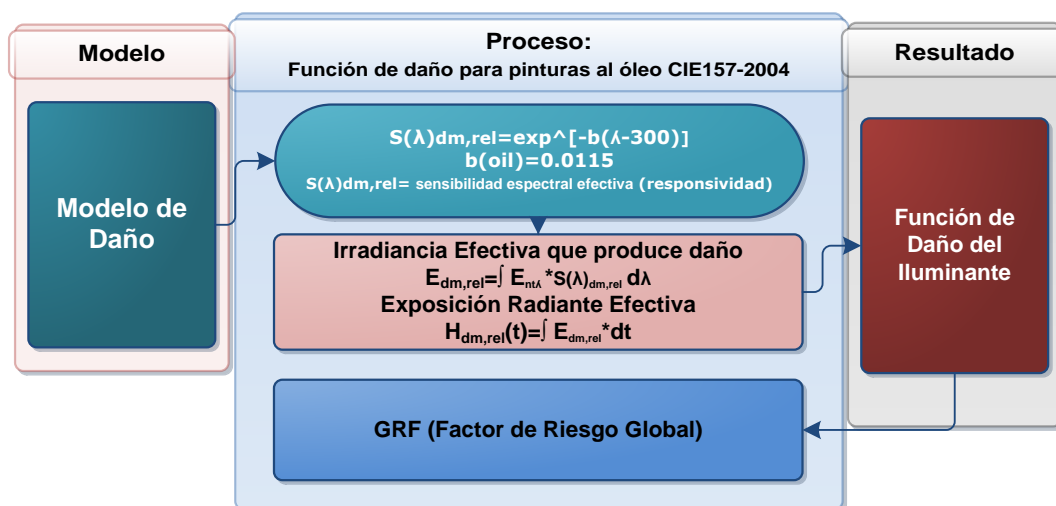


Figura 4.11 Diagrama del modelo para la obtención de la Función de Daño.

La responsividad $s(\lambda)_{dm,rel}$ del material expuesto se obtiene con la ecuación (3.18). Para su cálculo se ha considerado la sensibilidad de las pinturas al óleo, donde según el modelo Berlín la constante $b = 0,0125$. La $H_{dm}(t)$ está expresado en Whm^{-2} . La irradiancia luminosa relativa espectral $E_{il,rel}(\lambda)$, está en $Wm^{-2}nm^{-1}$, y se calcula combinando el perfil espectral de la irradiancia solar normalizada ($E_{rel}(\lambda)$) con el valor de iluminancias obtenidos en el modelo fotométrico F_{fot} y un factor de escala $k_{il,fot}$ que ajusta los valores reales fotométricos con los valores espectrales normalizados, mediante la siguiente expresión

$$E_{il,rel}(\lambda) = E_{rel}(\lambda) k_{il,fot}. \quad (4.3)$$

$k_{il,fot}$ se obtiene con la siguiente ecuación,

$$k_{il,fot} = \frac{F_{fot}}{F'_{fot}}, \quad (4.4)$$

en $lx\ m^2W^{-1}$.

El valor F'_{fot} en Wm^{-2} es la irradiancia luminosa relativa para cada punto, que se obtiene a partir de

$$F'_{fot} = k \int E_{rel}(\lambda) V(\lambda) d\lambda. \quad (4.5)$$

Del mismo modo, se puede calcular el umbral de la exposición de irradiancia efectiva espectral $H_{dm}(\lambda)$ de la *luz natural* durante un periodo de tiempo t con la ecuación,

$$H_{dm}(\lambda, t) = E_{il,rel}(\lambda) s(\lambda)_{dm,rel} t. \quad (4.6)$$

Es interesante conocer la evaluación espectral de $H_{dm}(\lambda)$ para entender como varía el daño que la *luz natural* produce en función del perfil espectral de la fuente.

En este estudio, se define el factor de daño (DM), como el valor que toma la exposición de irradiancia efectiva H_{dm} cuando se analiza un punto específico de la pared del claustro, en un período de tiempo determinado, teniendo en cuenta, las condiciones de iluminación

descritas anteriormente y los modelos geométricos, fotométricos y espectrales para la *luz natural*.

Una forma de determinar el DM que se produce, es relacionar la cantidad de irradiancia efectiva real a la que van a estar expuestas las obras, con la recomendada por las instituciones señaladas, que en esta tesis se ha usado las dadas por la CIE para el óleo, material utilizado en este caso. En este modelo se propone un Factor de Riesgo Global (GRF_A), que es una cantidad numérica estándar de medida, que relaciona el valor H_{dm} para la *luz natural* con el H_{dmA} para un iluminante A estándar (lámpara incandescente) a 50 *lux*, que es el patrón según los criterios de conservación preventiva, que equivale a un $H_{dmA} = 0,0102 \text{ Whm}^{-2}$. El GRF_A obtenido en la comparación indica cuántas veces el área iluminada es mayor, igual o menor que el H_{dmA} recomendado. Este parámetro puede servir como una medida estándar de DM , y proporciona información sobre los posibles daños que las obras de arte sufrirían en una exposición con *luz natural* en comparación con una fuente patrón de iluminación constante. Por ejemplo, un $GRF_A = 2$ indica que la zona expuesta a la *luz natural* ha sufrido el doble de daño que el que hubiera tenido al haberla expuesto a un iluminante con 50 *lux*. Idealmente, cuanto más bajo sea el factor GRF_A , menos deterioro supondrá para las obras.

La potencia de cálculo de la GRF_A y su flexibilidad hacen que este método sea una herramienta muy útil para restauradores y diseñadores de exposiciones. El valor de GRF_A se obtiene mediante la ecuación,

$$GRF_A = \frac{H_{dm}}{H_{dmA}}. \quad (4.7)$$

Para el cálculo de GRF_A , es necesario integrar adecuadamente los modelos anteriores.

4.2.4. Modelo Meteorológico

Con el fin de conocer las características lumínicas del claustro hay que considerar la localización geográfica del Monasterio (Rascafría, Madrid). Para este fin, se ha desarrollado un modelo que contempla la estimación de la distribución espectral de la *luz natural* en la zona, según los diferentes tipos de días a lo largo del año (Figura 4.12).

Para conocer la frecuencia con la que se repiten los tres tipos de días utilizados en la investigación, se han consultado y tenidos en cuenta los valores estadísticos que proporcionan el Instituto Nacional de Meteorología (AEMET) y SATEL ^[151,152] para la zona estudiada.

4.3. Resultados

4.3.1. Iluminancias obtenidas en el Modelo Geométrico-Fotométrico

En la Figura 4.13 se representa un ejemplo de la distribución de iluminancias obtenidas con el modelo del día siete de marzo a las 10

horas para un día tipo A (día despejado). En la figura se aprecia que las paredes 1 y 2 son las áreas que mayor radiación reciben a esa hora y en ese día, siendo la pared 4 la que menos radiación recibe.

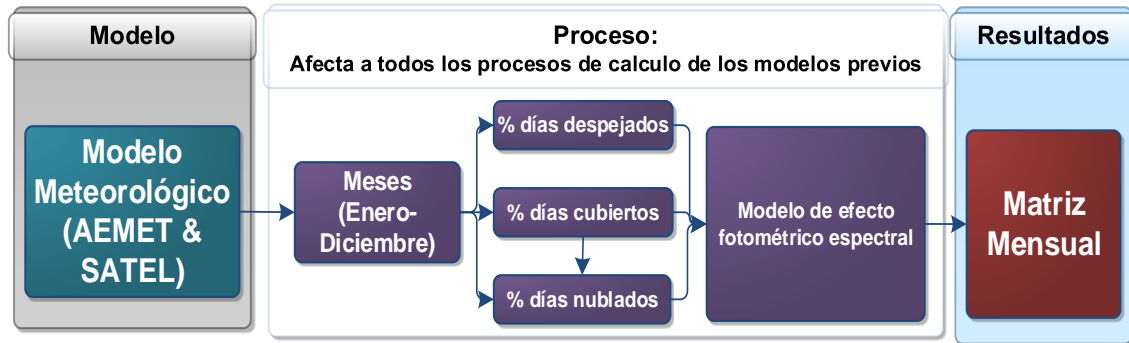


Figura 4.12 Diagrama del modelo Meteorológico.

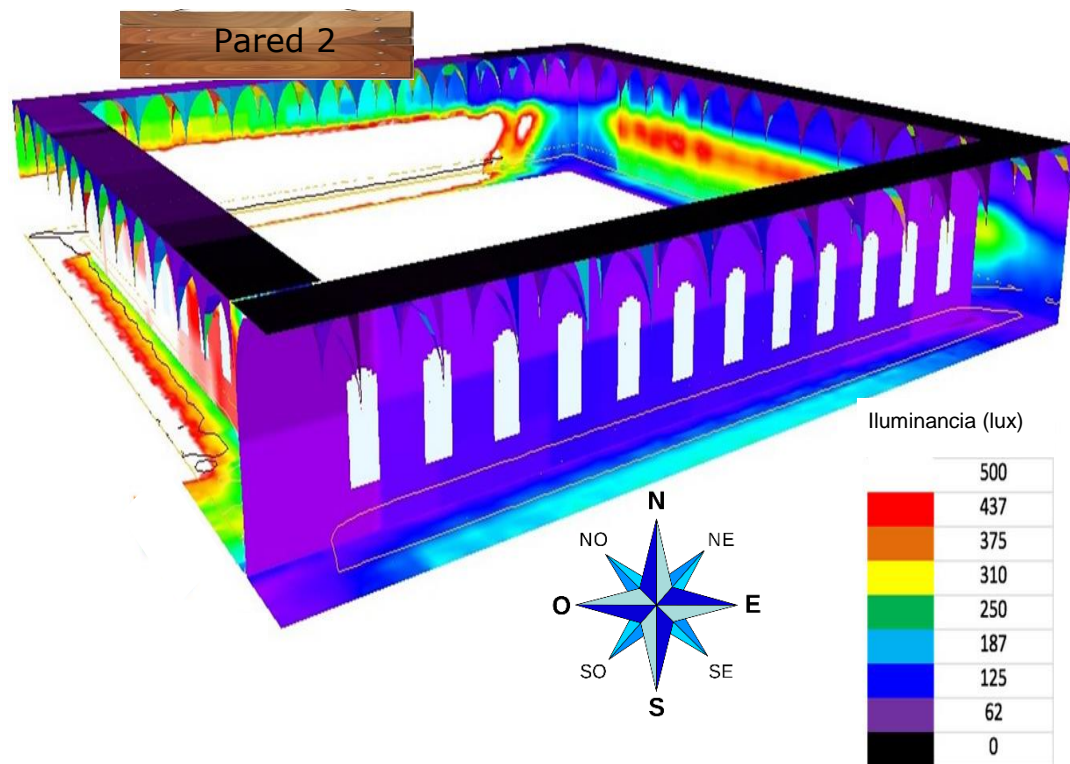


Figura 4.13 a) Valores de iluminancias del claustro obtenidos con el modelo Geométrico Fotométrico, para la luz natural de un día despejado en marzo a las 10 a.m. b) El equivalente de cada color en lux se muestra en la tabla de la figura.

En el análisis de este modelo, las variaciones de iluminancia a lo largo del día desde orto a ocaso, sirven para conocer las zonas del

claustro con más exposición, según el sol modifica su posición a lo largo de las estaciones climáticas, para cada pared, y para cada tipo de día.

4.3.2. Correspondencia entre los valores medidos y los calculados en el modelo Geométrico-Fotométrico

En la Figura 4.14 se representa la desviación media en %. Esta desviación se ha obtenido comparando los valores de iluminancia medidos durante el periodo 2009-2013 con los obtenidos en el modelo fotométrico. La comparación entre las dos series, mediciones y modelo fotométrico, se realizó con los valores medios de las iluminancias del modelo fotométrico que coinciden con la posición en la pared en la que está colocado cada luxómetro.

A partir del resultado obtenido, se puede aceptar como válido el modelo, ya que, en la peor situación, la desviación es menor al 6%.

4.3.3. Modelo espectral

En la Figura 4.15 se representan los valores de la irradiancia directa, desde el amanecer al cenit, considerando las características espectrales de la luz en la zona.

En la figura se observa la variabilidad espectral de la *luz natural* y la variación de la intensidad. Por este motivo, es muy complejo el uso y control de este tipo de iluminación sobre objetos del patrimonio cultural.

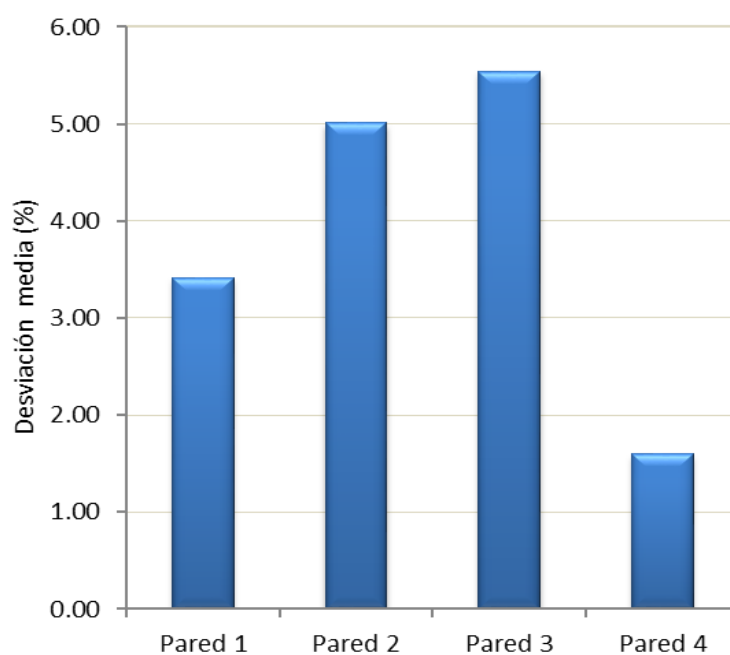


Figura 4.14 Comparación de los datos medidos con los datos obtenidos en el modelo geométrico fotométrico.

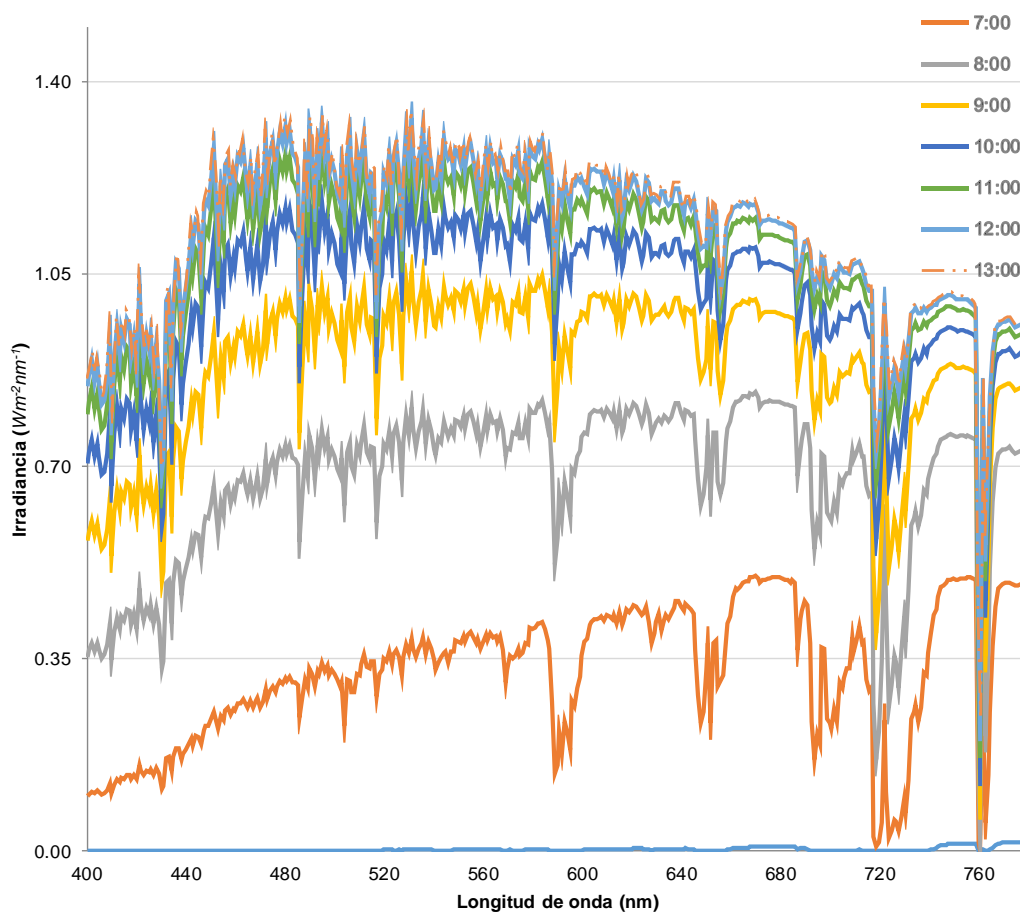


Figura 4.15 Curvas de irradiancia espectral desde orto a ocaso para un día claro de Mayo.

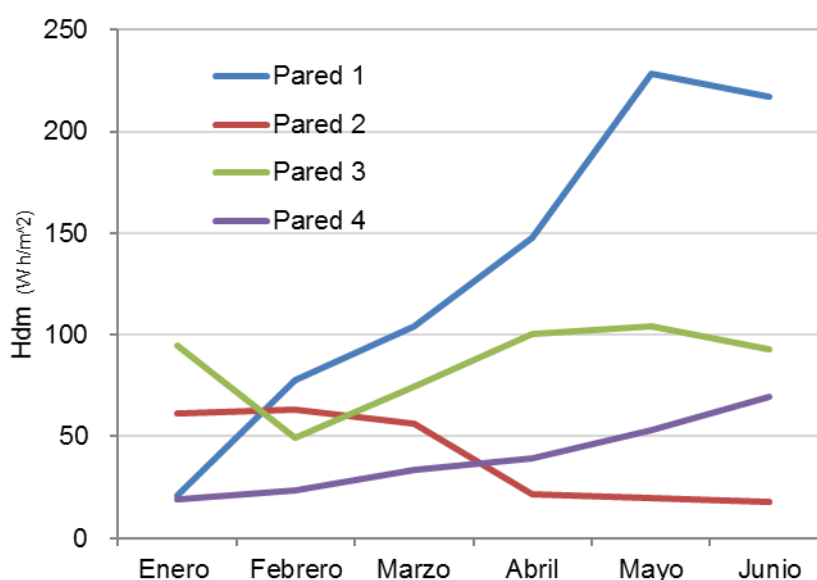


Figura 4.16 Valores máximos de exposición radiante efectiva H_{dm} para cada pared del claustro. Eje vertical representa el valor medio de H_{dm} de los máximos obtenidos para cada día del mes.

4.3.4. Modelo de Daño efectivo en las paredes verticales

Los resultados obtenidos en este modelo, determinan las cantidades de exposición radiante efectiva H_{dm} acumulada en el tiempo, para cada una de las paredes del claustro, donde se encuentran colocados los óleos. El H_{dm} se ha caracterizado en matrices de 200×30 puntos para cada pared. En general, las cantidades de H_{dm} (Figura 4.16) no supera las recomendaciones de la CIE [79], que fija el umbral de la responsividad baja de los óleos en 850 Whm^{-2} . En el análisis realizado para cada punto de la pared, se han encontrado áreas en las que se supera el H_{dm} recomendado, se ha detectado que son zonas expuestas a la luz solar directa en algunos momentos del día. En la Figura 4.16 se muestra la evolución en el tiempo de las cantidades medias de cada mes (de enero a junio) en las zonas de cada pared que reciben más radiación.

En la Figura 4.17 se representa el valor acumulado máximo medio para los puntos que reciben más radiación en cada pared.

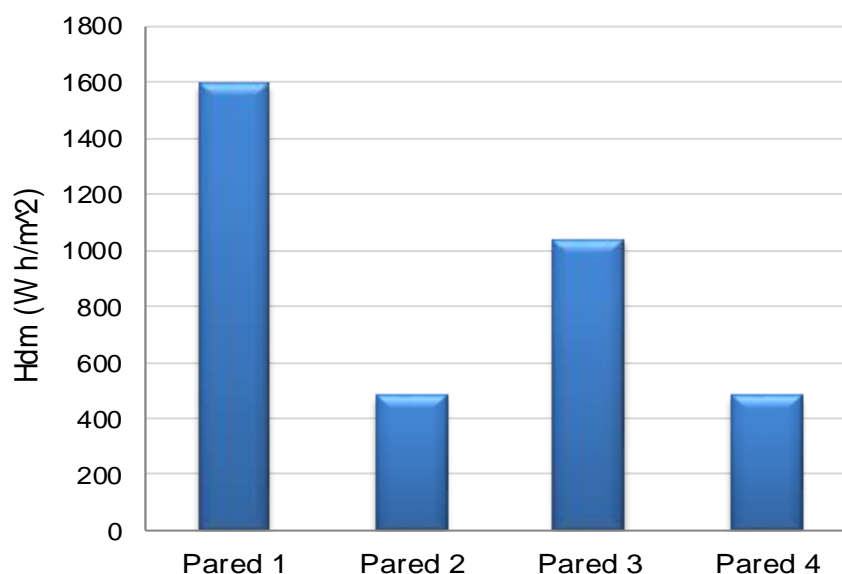


Figura 4.17 Valor anual máximo de la exposición radiante efectiva H_{dm} en los puntos de las paredes que reciben más radiación.

4.3.5. Evaluación espacio temporal del Daño efectivo.

En la Figura 4.18 se representa el comportamiento espectral de la exposición radiante efectiva $H_{dm}(\lambda)$ con tres tipos de iluminación: *luz natural* directa, *luz natural* difusa y un iluminante A. En la comparación del $H_{dm}(\lambda)$ entre ellos (se compara el cambio de color (ΔE_{ab}^*) que se ha producido debido a la sensibilidad del óleo a las longitudes de onda corta y al tiempo de exposición t_s para cada iluminación), el iluminante A produce menos daño que la *luz natural* en radiación difusa y directa, porque su perfil espectral tiene un menor nivel de irradiancia en longitudes de onda cortas.

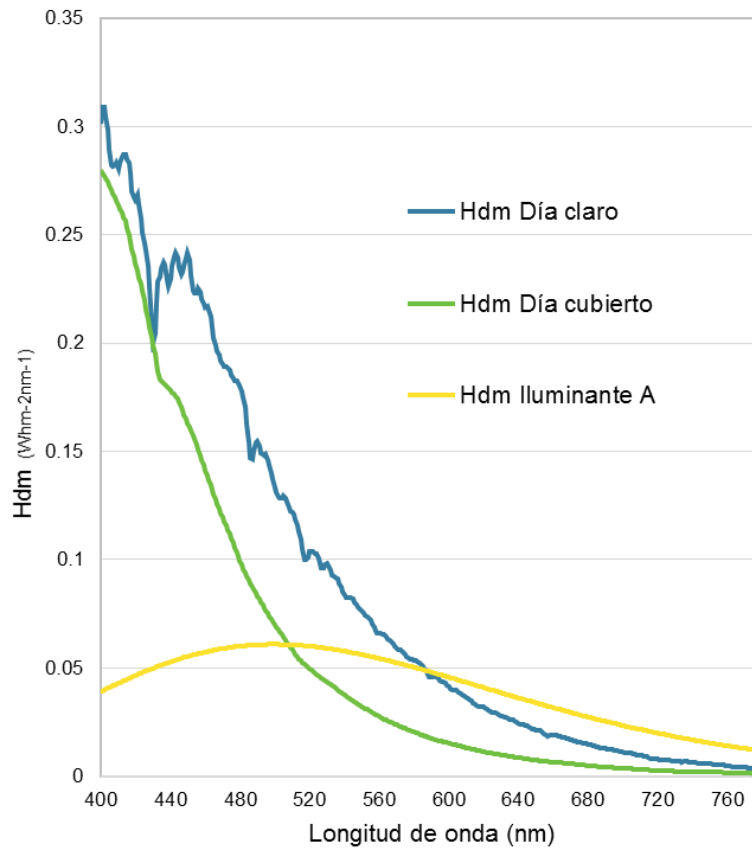


Figura 4.18 Comparación de la respuesta espectral entre los iluminantes usados.

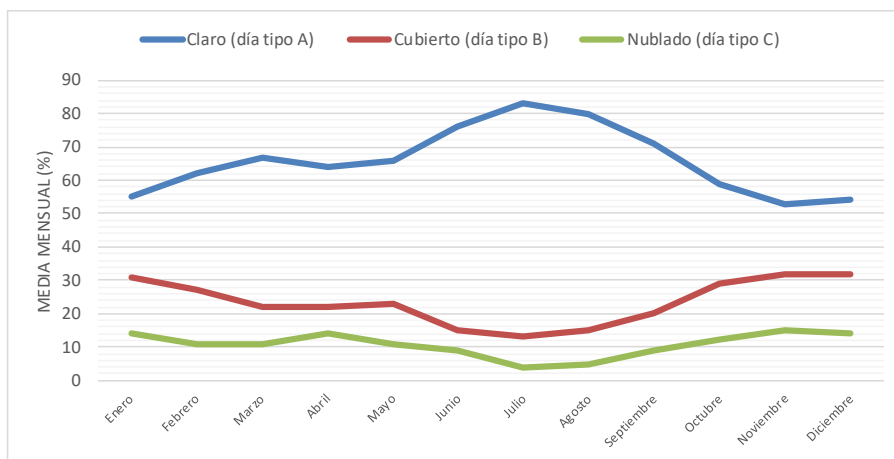


Figura 4.19 Porcentajes medios para cada tipo de día en Rascafría (Madrid).

4.3.6. Modelo Meteorológico

En la Figura 4.19 se representa la frecuencia de los tipos de días (A, B y C) medios según los modelos de AEMET y SATEL, para Rascafría, lugar donde se ubica el claustro del Monasterio.

4.4. *Factor de Riesgo Global (GRF_A)*

La Figura 4.20 representa el GRF_A acumulado durante seis meses en las paredes 1 y 4 del claustro.

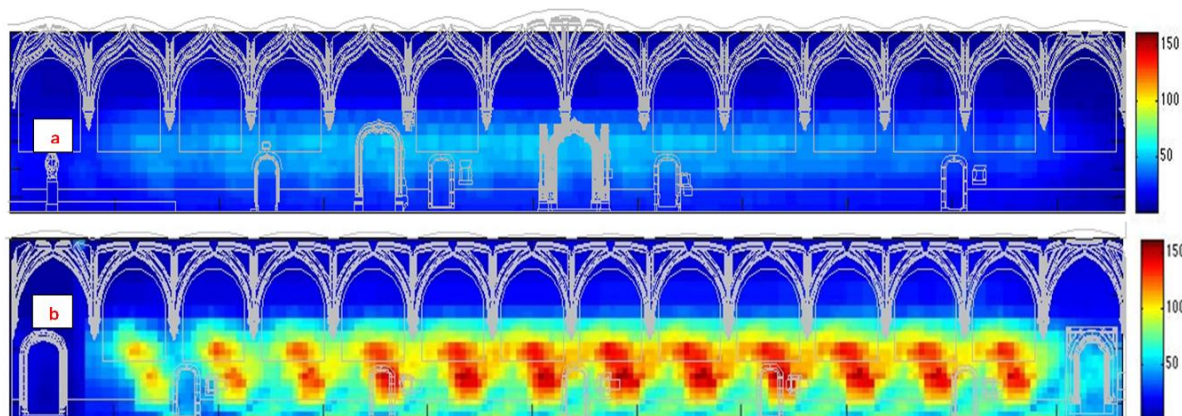


Figura 4.20 Los valores de GRF_A en la pared 4 (a) y en la pared 1 (b) del claustro, de enero a junio, en comparación con la lámpara incandescente de 50 Lux.

La información contenida en esta figura, permite a las personas responsables de mantener el claustro, apreciar cómo el H_{dm} actúa en cada zona de la pared. En algunas partes de la pared 1, el valor acumulado en seis meses es de $GRF_A = 150$ (Figura 4.20(b)). Si este valor fuese considerado elevado por parte de los restauradores, se podría reducir la transmitancia de la ventana mediante un filtro mayor, o bien generar mecanismos para proteger las zonas más expuestas en las horas y meses con más radiación incidente.

La investigación se puede aplicar para cada obra de arte, cada espacio, cada hora y cada mes.

Los óleos de la pared 1 tienen un GRF_A mayor comparado con el de las demás paredes. Las regiones que reciben más radiación en la pared

3 tienen un $GRF_A \text{ medio} = 80$, que es la mitad del valor máximo de la pared 1.

El promedio anual de los valores máximos acumulados en la pared 2 es de $GRF_A = 40$ y en la pared 4 es de $GRF_A = 50$.

Investigaciones previas ^[21,64,78,79,85,95,150] desaconsejarían el uso de zonas de la pared que alcanzasen un valor $GRF_A = 150$, ya que esta cantidad equivale a tener una iluminancia constante en esas zonas 150 veces superiores a la recomendada por la CIE ^[56] para materiales sensibles.

Preventivamente, las obras de arte situadas en las zonas donde el valor de GRF_A es más elevado están siendo monitorizados para evitar daños.

4.5. *Discusión*

La *luz natural* es, a menudo, una parte esencial en la exposición de obras de arte; ya sea porque su uso se ha considerado inevitable o porque es una parte esencial de la obra en sí misma, como en el caso estudiado en el presente capítulo.

Las ventajas del uso de la iluminación natural en la arquitectura son ampliamente aceptadas. En los estudios de iluminación aplicados al patrimonio cultural, especialmente en aquellos que usan *luz natural*, es esencial tener en cuenta la distribución espectral de la radiación, ya que el factor de daño (DM) es muy dependiente de la longitud de onda

de la radiación. Además, los valores obtenidos son diferentes a los obtenidos cuando sólo se analiza la iluminancia, ya que los cambios de la distribución espectral de la *luz natural* son sustanciales en función del tiempo, del tipo de día y de la orientación del lugar estudiado.

El análisis detallado y preciso llevado a cabo en este estudio se puede aplicar para obtener valores fiables del daño, que hace que la utilización de la *luz natural* sea una fuente óptima de iluminación, aplicando una metodología científica y de uso sencillo para todo el personal involucrado en la conservación preventiva.

En el sistema de cálculo se aplica la distribución espectral de la *luz natural* para evaluar el impacto en cada área de la obra, teniendo en cuenta el nivel de radiación estimada en cada punto y en cada momento. La posibilidad de disponer de mapas espacio-temporales del daño, proporciona a los responsables de la exposición una herramienta indispensable, que puede definir la política de la exposición de objetos de arte (lugar correcto y el momento en que puedan ser exhibidos). Por otra parte, el responsable de la exposición o restaurador, puede evaluar si este impacto es lo suficientemente relevante para reubicar las obras de arte, o bien para utilizar filtros con más protección, u otro tipo de medidas a considerar. Independientemente de cómo solucionar un posible deterioro, esta herramienta permite saber de antemano que el daño va a existir y además cuantificarlo numéricamente.

Por último, el valor de GRF_A admite la posible toma de decisiones sobre la conveniencia de exponer ciertos tipos de objetos de arte, según la sensibilidad del material, y tener en cuenta no sólo la ubicación de las obras, sino también los períodos de tiempo en los que tienen que ser exhibidas. En las zonas de GRF_A elevado, los objetos con una sensibilidad baja se pueden visualizar durante todo el año, o, alternativamente, para mostrar las obras más sensibles es posible elegir los períodos de tiempo en los que el GRF_A es menor.

El claustro objeto de la investigación, se encuentra en un lugar muy turístico con gran afluencia de público, sobre todo en verano. En esta época sería conveniente exhibir las pinturas en las zonas más protegidas. Las áreas con menor GRF_A serían las más ventajosas para exhibir las obras de arte de forma permanente.

Capítulo 5

Conclusiones

5. *Conclusiones*

- i. Se ha desarrollado un modelo espectral de daño relativo, con los valores obtenidos en las series de envejecimiento de pinturas, que permite conocer el comportamiento fotoquímico de las mismas; con el tiempo y con la cantidad de radiación recibida. Para ello se ha diseñado, fabricado y calibrado un sistema experimental monitorizado, que permite la radiación controlada espectralmente selectiva sobre muestras de pintura. Se han elaborado treinta y nueve muestras de pintura con distintos colores y tres materiales diferentes, oleo, gouache y acrílico, seleccionadas por los departamentos de restauración del Museo Reina Sofía y Thyssen, por su importancia en la restauración.
- ii. Se han realizado siete series de envejecimiento sobre las muestras de pinturas a baja y alta radiación, que han permitido obtener datos precisos sobre el efecto de la radiación visible a diferentes longitudes de onda y niveles de radiación.
- iii. Se ha comprobado en el modelo del daño relativo, que el parámetro de peso espectral b , valor numérico característico de cada tipo de material, que relaciona el daño con la longitud de onda, varía con el tiempo y con las características espectrales de las fuentes de luz utilizadas. Dicho comportamiento permite concluir, que el daño

relativo con una fuente de luz específica es más alto en las pinturas jóvenes que en las antiguas.

- iv. Se ha comprobado que el parámetro de peso espectral b , disminuye a medida que aumenta el envejecimiento del material utilizado en este estudio. Esta tendencia depende del tipo de material estudiado, durante el tiempo aplicado en el estudio los datos han resultado:
 - a. En las *muestras* de pintura de acrílico, b disminuye 1,69 veces.
 - b. En las *muestras* de pintura de gouache b disminuye 2,63 veces.
 - c. En las *muestras* de pintura de óleo b disminuye 2,61 veces.
- v. Se ha estimado, mediante el modelo de daño relativo, cuánto tiempo y con qué intensidad se puede radiar con una fuente de luz sobre una pintura sin sufrir un cambio de color que pueda ser apreciable por los visitantes.
- vi. Se ha obtenido a través del modelo espectral de daño relativo, información útil sobre el cambio de color de las muestras de pintura utilizadas, que puede ser útil en un proceso de restauración de una pintura antigua.
- vii. Se ha propuesto, el empleo de una metodología para el cálculo del daño relativo producido por la iluminación natural sobre patrimonio cultural. Dicho modelo tiene en cuenta su variabilidad a lo largo del día, el clima de la zona, la época del año, las características espectrales de la fuente de iluminación y las características del material de la exposición. Dicha metodología hace uso de una

herramienta que, mediante los mapas espaciotemporales de daño relativo, puede ayudar a los responsables de la exposición a definir los criterios de exhibición de las obras para su correcta conservación.

- viii. Se ha aplicado dicho modelo a una exposición permanente en el claustro del monasterio de Santa María de El Paular, que ha permitido contar con mapas espaciotemporales de daños relativos sobre los óleos. Esto implica determinar la posición ideal de la obra expuesta en el claustro para mejorar la conservación.

Bibliografía

Bibliografía

1. Ministerio de Educación Cultura y Deporte. (2016).
<http://www.mecd.gob.es/planes-nacionales/planes/investigacion-conservacion.html>.
2. J. A. Hierro and J. M. Fernández, "Activos culturales y desarrollo sostenible: la importancia económica del Patrimonio Cultural," *Política Y Sociedad*, vol. 50, pp. 1133, 2013.
3. (2016). <http://www.iccrom.org>.
4. (2016). <http://icom.museum/L/1/>.
5. Unesco. Conferencia General, *Convención Sobre La Protección Del Patrimonio Mundial, Cultural Y Natural, Paris*. París: Unesco, 1972.
6. Ministerio de Educación Cultura y Deporte. (2016).
<http://www.mecd.gob.es/planes-nacionales/planes/conservacion.html>.
7. S. Michalski, "Agent of deterioration: light, ultraviolet and infrared," *Ottawa: Canadian Conservation Institute*, pp. 23, 2013-7-18, 2013.

8. M. A. Querol, *Manual De Gestión Del Patrimonio Cultural*. Ediciones AKAL, 2010.
9. V. Bína *et al*, "ESSnet Culture European Statistical System: Network on Culture," *Final Report*, vol. 18, pp. 2013, 2012.
10. J. Jokilehto, *International Centre for the Study of the Preservation. ICCROM and the Conservation of Cultural Heritage: A History of the Organization's First 50 Years, 1959-2009*. ICCROM Rome, 2011.
11. 15 Conferencia Trienal del ICOM-CC, "Diversity in heritage conservation: Tradition, innovation and participation," in *Terminología Para Definir La Conservación Del Patrimonio Cultural Tangible*, Nueva Delhi, India, 2008, pp. 1-2.
12. I. M. G. Fernández, "Historia de la conservación preventiva*. Parte I," *Ge-Conservación*, pp. 27-41, 2013.
13. M. Koller, "Learning from the history of preventive conservation," *Studies in Conservation*, vol. 39, pp. 1-7, 1994.
14. G. Thomson, "Contributions to the London Conference on museum climatology," 18-23 September 1967, 1968.
15. I. M. García Fernández, "Historia de la Conservación Preventiva. Parte II," *Ge-Conservación*, pp. 5-18, 2014.

16. ARAAFU (1992). La Conservation Préventive, "Colloque sur la conservation-restauration des biens culturels," Paris, 8, 9 y 10 de octubre, 1992.
17. Canadian Conservation Institute, "Framework for the Preservation of Museum Collections Wall Chart." Ottawa, 1994.
18. S. Michalski, "A systematic approach to preservation: Description and integration with other museum activities," in *Preventive Conservation: Practice, Theory and Research. Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress, 12-16 September, 1994*, pp. 8-11.
19. R. Waller, "Conservation risk assessment: A strategy for managing resources for preventive conservation," in *Preventive Conservation: Practice, Theory and Research. Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress, 12-16 September 1994*, 1994, pp. 12-16.
20. G. Morate Martin, "La Economía sin ambages en la gestión del patrimonio," 2013.
21. G. Thomson, *The Museum Environment*. London: Butterworth-Heinemann, 1986.

22. N. Stolow, *Conservation Standards for Works of Art in Transit and on Exhibition*. Unesco, 1979.
23. A. Roy and P. Smith, "Preventive conservation practice, theory and research," Ottawa, 12-16 September, 1994.
24. G. Pavlogeorgatos, "Environmental parameters in museums," *Build. Environ.*, vol. 38, pp. 1457-1462, 2003.
25. N. Stolow, *Conservation and Exhibitions. Packing, Transport, Storage and Environmental Considerations*. Butterworths, 1986.
26. S. Michalski, "Care and preservation of collections," in *Running a Museum: A Practical Handbook*, Boylan P., Ed. International Council of Museums, 2004, pp. 51-90.
27. S. Michalski *et al*, "A systematic approach to the conservation (care) of museum collections: with technical appendices," vol. Canadian Conservation Institute, 1992.
28. S. Michalski, *Guidelines for Humidity and Temperature for Canadian Archives*. Ottawa, Canadian: Canadian Conservation Institute, 2000.
29. S. Michalski, "Museum climate and global climate. Doing the right thing for both," *Reflections on Conservation*, 2011.

30. S. Michalski, "Preservación de las colecciones," *Cómo Administrar Un Museo: Manual Práctico*. París: ICOM, 2006.
31. R. K. Clayton, *Light and Living Matter: A Guide to the Study of Photobiology; the Physical Part*. New York: MacGraw-Hill, 1970.
32. E. B. Goldstein, *The Blackwell Handbook of Sensation and Perception*. John Wiley & Sons, 2008.
33. P. A. Tipler, G. Mosca and A. Bramón, *Física Para La Ciencia Y La Tecnología*. Barcelona: Reverté, 2005.
34. G. N. Lewis, "The conservation of photons," *Nature*, vol. 118, pp. 874-875, 1926.
35. M. Planck, "Ueber das gesetz der energieverteilung im normalspectrum," *Annalen Der Physik*, vol. 309, pp. 553-563, 1901.
36. L. de la Peña, *Introducción a La Mecánica Cuántica*. México: Fondo de Cultura económica, 2010.
37. T. T. Schaeffer, *Effects of Light on Materials in Collections: Data on Photoflash and Related Sources*. Los Angeles: Getty Publications, 2002.

38. D. B. Judd, "Appraisal of Land's work on two-primary color projections," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 50, pp. 254-268, 1960.
39. M. D. Fairchild and L. Reniff, "A pictorial review of color appearance models," in *Color and Imaging Conference*, 1996, pp. 97-100.
40. Y. Nayatani *et al*, "Whiteness-blackness and brightness response in a nonlinear color-appearance model," *Color Research & Application*, vol. 12, pp. 121-127, 1987.
41. M. D. Fairchild and R. S. Berns, "Image color-appearance specification through extension of CIELAB," *Color Research & Application*, vol. 18, pp. 178-190, 1993.
42. Y. Nayatani *et al*, "A nonlinear color-appearance model using estévez-hunt-pointer primaries," *Color Research & Application*, vol. 12, pp. 231-242, 1987.
43. R. Hunt, "Revised colour-appearance model for related and unrelated colours," *Color Research & Application*, vol. 16, pp. 146-165, 1991.
44. M. R. Luo, M. Lo and W. Kuo, "The LLAB (l: c) colour model," *Color Research & Application*, vol. 21, pp. 412-429, 1996.

45. S. L. Guth, "ATD model for color vision I: Background and discussion," in *IS&T/SPIE 1994 International Symposium on Electronic Imaging: Science and Technology*, 1994, pp. 149-152.
46. S. L. Guth, "ATD model for color vision II: Applications," in *IS&T/SPIE 1994 International Symposium on Electronic Imaging: Science and Technology*, 1994, pp. 153-162.
47. S. L. Guth, "Further applications of the ATD model for color vision," in *IS&T/SPIE's Symposium on Electronic Imaging: Science & Technology*, 1995, pp. 12-26.
48. S. L. Guth, "Model for color vision and light adaptation," *Josa A*, vol. 8, pp. 976-993, 1991.
49. S. L. Guth, "Unified model for human color perception and visual adaptation II," in *IS&T/SPIE's Symposium on Electronic Imaging: Science and Technology*, 1993, pp. 440-448.
50. S. L. Guth, R. W. Massof and T. Benzscharwel, "Vector model for normal and dichromatic color vision," *Josa*, vol. 70, pp. 197-212, 1980.
51. R. M. Boynton, "Color vision," *Annu. Rev. Psychol.*, vol. 39, pp. 69-100, 1988.

52. R. L. De Valois and K. K. De Valois, "A multi-stage color model," *Vision Res.*, vol. 33, pp. 1053-1065, 1993.
53. R. L. De Valois and K. D. De Valois, "Neural coding of color." 1997.
54. E. Chorro, "Procesado Cortical Y Uniformidad Del Espacio De Color: Hacia Una Métrica Euclídea Para Diferencias De Color." , Universidad de Alicante, España, 2011.
55. CIE Technical Report, "Industrial colour-difference evaluation," CIE Central Bureau, Vienna, Austria, Tech. Rep. 116, 1995.
56. CIE Technical Report, "Colorimetry," CIE Central Bureau, Vienna, Austria, Tech. Rep. 15, 2004.
57. M. Luo, C. Li and G. Cui, "Combining colour appearance model with colour difference formula," in *The 10th Congress of the International Colour Association (AIC'05)*, 2005, pp. 8-13.
58. M. R. Luo, G. Cui and C. Li, "Uniform colour spaces based on CIECAM02 colour appearance model," *Color Research & Application*, vol. 31, pp. 320-330, 2006.

59. CIE Technical Report, "A colour appearance model for colour management systems: CIECAM02," CIE, Vienna, Austria, Tech. Rep. 159, 2004.
60. M. D. Fairchild, *Color Appearance Models*. Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2013.
61. D. B. Judd, "The 1931 ICI standard observer and coordinate system for colorimetry," *Josa*, vol. 23, pp. 359-373, 1933.
62. A. V. Muñoz, *Principios De Color Y Holopintura*. Editorial Club Universitario, 2013.
63. M. D. Fairchild, "Color and image appearance models," *Color Appearance Models*, pp. 340, 2005.
64. Chartered Institution of Building Services and Illuminating Engineering Service, "Lighting Guide-Museums and Art Galleries," 1980.
65. F. Verdú and J. Pujol, "Revisión del cálculo del rendimiento en color de fuentes luminosas." *Óptica Pura Y Aplicada*, vol. 33, pp. 1-43, 2000.
66. P. van der Burgt and J. van Kemenade, "About color rendition of light sources: The balance between simplicity and

- accuracy," *Color Research & Application*, vol. 35, pp. 85-93, 2010.
67. K. C. Lin, "Approach for optimization of the color rendering index of light mixtures," *Josa A*, vol. 27, pp. 1510-1520, 2010.
68. P. Bodrogi, S. Brückner and T. Q. Khanh, "Ordinal scale based description of colour rendering," *Color Research & Application*, vol. 36, pp. 272-285, 2011.
69. E. Dikel and C. Yener, "A lighting coordinate database for 3D art objects," *Build. Environ.*, vol. 42, pp. 246-253, 2007.
70. S. Aydinli, G. Hilbert and J. Krochmann, "Über die Gefährdung von Ausstellungsgegenständen durch optische Strahlung," *Lichtforschung*, vol. 5, pp. 35-48, 1983.
71. D. Saunders and J. Kirby, "Wavelength-dependent fading of artists' pigments," *Studies in Conservation*, vol. 39, pp. 190-194, 1994.
72. D. L. Loe, E. Rowlands and N. Watson, "Preferred lighting conditions for the display of oil and watercolour paintings," *Lighting Research and Technology*, vol. 14, pp. 173-192, 1982.

73. I. Knez, "Effects of indoor lighting on mood and cognition," *J. Environ. Psychol.*, vol. 15, pp. 39-51, 1995.
74. R. A. Baron, M. S. Rea and S. G. Daniels, "Effects of indoor lighting (illuminance and spectral distribution) on the performance of cognitive tasks and interpersonal behaviors: The potential mediating role of positive affect," *Motiv. Emotion*, vol. 16, pp. 1-33, 1992.
75. M. Scuello *et al*, "Museum lighting: optimizing the illuminant," *Color Research & Application*, vol. 29, pp. 121-127, 2004.
76. A. A. Kruithof, "Tubular luminescence lamps for general illumination," *Philips Tech.Review*, vol. 6, pp. 65-96, 1941.
77. R. G. Davis and D. N. Ginthner, "Correlated color temperature, illuminance level, and the Kruithof curve," *Journal of the Illuminating Engineering Society*, vol. 19, pp. 27-38, 1990.
78. R. L. Feller, "Control of deteriorating effects of light on museum objects: heating effects of illumination by incandescent light," *Museum News. Technical Supplement*, vol. 46, pp. 33-47, 1968.
79. CIE Technical Report, "Control of damage to museum objects by optical radiation," Vienna, Austria, Tech. Rep. 157, 2004.

80. CIE Informe Técnico, "Fuentes de luz eléctrica. estado del arte-1991," Vienna, Austria, Tech. Rep. 96, 1992.
81. C. W. Kesner, "Museum exhibition lighting: visitor needs and perceptions of quality," *Journal of the Illuminating Engineering Society*, vol. 22, pp. 45-54, 1993.
82. C. Chain, D. Dumortier and M. Fontoynt, "A comprehensive model of luminance, correlated colour temperature and spectral distribution of skylight: comparison with experimental data," *Solar Energy*, vol. 65, pp. 285-295, 1999.
83. D. H. Brainard and B. A. Wandell, "Asymmetric color matching: how color appearance depends on the illuminant," *Josa A*, vol. 9, pp. 1433-1448, 1992.
84. R. S. Berns, "Designing white-light LED lighting for the display of art: A feasibility study," *Color Research & Application*, vol. 36, pp. 324-334, 2011.
85. G. Thomson, "A new look at colour rendering, level of illumination, and protection from ultraviolet radiation in museum lighting," *Studies in Conservation*, vol. 6(2-3): 49-70, 1961.

86. C. Cuttle, "Damage to museum objects due to light exposure," *Lighting Research and Technology*, vol. 28, pp. 1-9, 1996.
87. S. Mayorga *et al*, "Advanced daylighting evaluation applied to cultural heritage buildings and museums: Application to the cloister of Santa Maria El Pualar," *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 1362-1370, 2016.
88. S. Mayorga *et al*, "Spectral damage model for lighted museum paintings: Oil, acrylic and gouache," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 22, pp. 931-939, 2016.
89. R. L. Feller, *Accelerated Aging: Photochemical and Thermal Aspects*. Michigan: Getty Publications, 1994.
90. S. Michalski, "The lighting decision," in *Fabric of an Exhibition: An Interdisciplinary Approach-Preprints. Preprints of Textile Symposium*, Ottawa, Canada, 1997, pp. 97-104.
91. S. B. Lee, J. Bogaard and R. L. Feller, "Damaging effects of visible and near-ultraviolet radiation on paper," in *Historic Textile and Paper Materials II, Conservation and Characterization, ACS Symp. Ser*, American Chemical Society, Ed. 1989, pp. 54-62.

92. S. B. Lee, J. Bogaard and R. L. Feller, "Darkening of paper following exposure to visible and near-ultraviolet radiation," *Journal of the American Institute for Conservation*, vol. 28(1), pp. 1-18, 2013.
93. S. Weintraub and G. O. Anson, "Natural light in museums, an asset or a threat," *Prog. Arch.*, vol. 71, pp. 49-54, 1990.
94. S. Weintraub, "Creating and maintaining the right environment," in *Caring for Your Collections*, Whelchel H, Ed. New York: Harry N. Abrams, Inc., 1992, pp. 18-29.
95. Illuminating Engineering Society of North America, *Museum and Art Gallery Lighting: A Recommended Practice*. New York: IESNA, 1996.
96. M. del-Egido and T. Calderón, *La Ciencia Y El Arte: Ciencias Experimentales Y Conservación Del Patrimonio Histórico*. Madrid: Ministerio de Cultura. Dirección General de Bellas Artes y Bienes Culturales, 2008.
97. H. E. Avery, *Cinética Química Básica Y Mecanismos De Reacción*. Barcelona: Reverté, 1982.
98. T. B. Brill, *Light: Its Interaction with Art and Antiquities*. New York: Plenum Press, 1980.

99. J. F. Rabek, *Mechanisms of Photophysical Processes and Photochemical Reactions in Polymers: Theory and Applications*. Chichester, England: John Wiley and Sons, 1987.
100. P. Suppan, *Chemistry and Light*. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 1994.
101. CIE Technical Collection 1990. CIE 89-1991, "89/3 On the deterioration of Exhibited Museum Objects by Optical Radiation," vol. ISBN 978 3 900734 26 8, 1991.
102. J. del Hoyo-Meléndez and F. Mecklenburg, "An investigation of the reciprocity principle of light exposures using microfading spectrometry," *Spectroscopy Letters*, vol. 44, pp. 52-62, 2011.
103. S. Michalski, "Towards specific lighting guidelines," in *ICOM Committee for Conservation, 9th Triennial Meeting*, Dresden, German Democratic Republic, 1990, pp. 583-588.
104. B. Crawford, "Just perceptible colour differences in relation to level of illumination," *Studies in Conservation*, vol. 18, pp. 159-166, 1973.

105. P. R. Boyce, "Visual acuity, colour discrimination and light level," in *Lighting in Museums, Galleries and Historic Houses*. Bristol, England, 1987, pp. 50-57.
106. D. Loe, "Preferred lighting for the display of paintings with conservation in mind," in *Lighting in Museums, Galleries and Historic Houses. Papers of the Conference. 9-10th April 1987*, Bristol, England, 1987, pp. 36-49.
107. J. E. Kaufman and H. Haynes, *IES Lighting Handbook, Reference Volume and Application Volume*. Baltimore, Md: Waverly Press, 1981.
108. CIE Technical Report, "An analytic model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance." CIE, Vienna, Austria, Tech. Rep. 19.21, 1981.
109. J. M. del Hoyo-Meléndez, M. F. Mecklenburg and M. T. Doménech-Carbó, "An evaluation of daylight distribution as an initial preventive conservation measure at two Smithsonian Institution Museums, Washington DC, USA," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 12, pp. 54-64, 2011.
110. W. J. Russell and W. de Wiveleslie, *Report to the Science and Art Department of the Committee of Council on Education on the Action of Light on Water Colours: Presented to both*

Houses of Parliament by Command of Her Majesty. London: HM Stationery Office, 1888.

111. L. S. Harrison, *Report on the Deteriorating Effects of Modern Light Sources.* Metropolitan Museum of Art New York, 1953.
112. T. Kenjo, "Discoloration of red colors irradiated with some monochromatic lights," *Science for Conservation*, pp. 31-34, 1987.
113. T. Kenjo, "Certain deterioration factors for works of art and simple devices to monitor them," *Museum Management and Curatorship*, vol. 5, pp. 295-300, 1986.
114. AENOR. UNE-EN ISO, "Textiles. ensayos de solidez del color. parte B02: Solidez del color a la luz artificial: Lámpara de arco de xenón," AENOR, Madrid, Tech. Rep. 105-B02:2014, 2014.
115. S. Michalski and J. Bridgland, "ICOM Committee for Conservation, 17th Triennial Meeting. The power of history in the analysis of collection risks from climate fluctuations and light." Paris, 2014.

116. N. H. Tennent and J. H. Townsend, "Light dosimeters for museums, galleries and historic houses," in *Lighting in Museums, Galleries and Historic Houses*, Bristol, 1987, pp. 31-35.
117. P. J. SMITH, "Photofading of pigments and photosensitiser materials," *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, vol. 107, pp. 282-282, 1991.
118. A. R. Robertson, "The CIE 1976 Color-Difference Formulae," *Color Research & Application*, vol. 2, pp. 7-11, 1977.
119. CIE Supplement Number 2 (E-1.3. 1, 1971), "Official recommendations on uniform color spaces, color-difference equations, and metric color terms," Commission Internationale de L'Clairage, Tech. Rep. CIE 15:1978, 1978.
120. H. Liu *et al*, "Color-difference evaluation for digital images using a categorical judgment method," *Josa A*, vol. 30, pp. 616-626, 2013.
121. G. Hilbert, S. Aydinli and J. Krochmann, "Zur Beleuchtung musealer Exponate: Neuere konservatorische Erkenntnisse," *Restauro*, vol. 97, pp. 313-321, 1991.

122. C. H. Giles *et al*, "Activation Energies of Light Fading of Non-ionic Disperse Dyes in Hydrophobic Polymers," *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, vol. 90, pp. 45-49, 1974.
123. R. Johnston-Feller *et al*, "The kinetics of fading: opaque paint films pigmented with alizarin lake and titanium dioxide," *Journal of the American Institute for Conservation*, vol. 23, pp. 114-129, 1984.
124. R. M. Johnston-Feller, "Reflections on the phenomenon of fading," *J. Coatings Technol.*, vol. 58, pp. 32-50, 1986.
125. F. Viénot, G. Coron and B. Lavédrine, "LEDs as a tool to enhance faded colours of museums artefacts," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 12, pp. 431-440, 2011.
126. ASTM, "Standard practices for producing films of uniform thickness of paint, varnish, and related products on test panels." American Society for Testing Materials, Tech. Rep. D823-95(2012)e1, 2012.
127. ASTM, "Standard test methods for lightfastness of colorants used in artists materials." American Society for Testing Materials, Tech. Rep. D4303-10 (2010), 2010.

128. International standard ISO, "Paint and varnishes. artificial weathering and exposure to artificial radiation; exposure to filtered xenon-arc radiation," Organización Internacional de Normalización, Ginebra, Suiza, Tech. Rep. 11341:2004, 2004.
129. H. Kim and B. Kim, "New evaluation method for the lightfastness of colored papers by radiant energy," *Journal of the Illuminating Engineering Society*, vol. 29, pp. 17-24, 2000.
130. H. Oda and T. Kitao, "Intramolecular quenching of the photofading of some dyes," *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, vol. 101, pp. 177-179, 1985.
131. Ng, H. C., & Guillet, J. E., "Singlet oxygen initiation of polymer photooxidation: photolysis of cis-1, 4-poly (isoprene hydroperoxide)," *Macromolecules*, vol. 11(5), 929-937, 1978.
132. A. E. Pattini, *La Luz Natural En Las Escuelas: Aprovechamiento Y Control De La Luz Solar En Las Aulas*. Ed. Dunken, 2009.
133. S. Chirarattananon, P. Chaiwiwatworakul and S. Pattanasethanon, "Daylight availability and models for

- global and diffuse horizontal illuminance and irradiance for Bangkok," *Renewable Energy*, vol. 26, pp. 69-89, 2002.
134. M. Krarti, P. M. Erickson and T. C. Hillman, "A simplified method to estimate energy savings of artificial lighting use from daylighting," *Build. Environ.*, vol. 40, pp. 747-754, 2005.
135. L. Roche, E. Dewey and P. Littlefair, "Occupant reactions to daylight in offices," *Lighting Research and Technology*, vol. 32, pp. 119-126, 2000.
136. A. D. Galasiu and J. A. Veitch, "Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylit offices: a literature review," *Energy Build.*, vol. 38, pp. 728-742, 2006.
137. H. Cheung and T. M. Chung, "A study on subjective preference to daylit residential indoor environment using conjoint analysis," *Build. Environ.*, vol. 43, pp. 2101-2111, 2008.
138. M. Navvab, "Art museums: A daylighting dilemma," *Ld A*, vol. 23, pp. 48-57, 1993.
139. E. F. Carla Balocco, "Natural lighting in the Hall of Two Hundred. A proposal for exhibition of its ancient tapestries," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 1697, pp. 1-118, 01-2009, 2009.

140. M. Navvab, "Daylighting system design and evaluation of the museum of contemporary art in Chicago," *Journal of the Illuminating Engineering Society*, vol. 27, pp. 160-173, 1998.
141. CIE Technical Report, "Daylight." Commission Internationale de L'Clairage, Vienna, Austria, Tech. Rep. CIE 16, 1970.
142. CIE Technical Report, "Spatial distribution of daylight - luminance distributions of various reference skies," Commission Internationale de L'Clairage, Vienna, Austria, Tech. Rep. CIE 110-1994, 1995.
143. P. J. Littlefair, *Predicting Hourly Internal Daylight Illuminances for Dynamic Building Energy Modelling*. Building Environmental Performance Analysis Club Garston, 1989.
144. P. Tregenza and I. Waters, "Daylight coefficients," *Lighting Research and Technology*, vol. 15, pp. 65-71, 1983.
145. S. Cannon-Brookes, "Daylighting museum galleries: a review of performance criteria," *Lighting Research and Technology*, vol. 32, pp. 161-168, 2000.
146. D. Vazquez Moliní *et al*, "New daylight damage calculation methodology applied to museums," in *Colour and Light in*

Architecture First International Conference, Venecia, Italia, 2010, pp. 327-334.

147. C. Balocco and R. Calzolari, "Natural light design for an ancient building: A case study," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 9, pp. 172-178, 2008.
148. T. De Graaf, M. Dessouky and H. F. Müller, "Sustainable lighting of museum buildings," *Renewable Energy*, vol. 67, pp. 30-34, 2014.
149. M. Wilson, "Lighting in museums: Lighting interventions during the European demonstration project 'Energy efficiency and sustainability in retrofitted and new museum buildings'(NNES-1999-20)," *International Journal of Sustainable Energy*, vol. 25, pp. 153-169, 2006.
150. R. L. Feller, "The deteriorating effect of light on museum objects: principles of photochemistry, the effect on varnishes and paint vehicles and on paper," *Museum News.Technical Supplement*, pp. 1-8, 1964.
151. (2016). *Agencia Estatal de Meteorología*. Available: <http://www.aemet.es>.

152. (2016). *SATEL*. Available: <http://www.satel-light.com/indexgS.htm>.
153. DIALux, "Diseño de Luz Diurna, Luz Artificial, Edificios Completos, Planificación de Espacios, Planificación de Viales," vol. 4.0, 2016.
154. C. G. Justus and M. V. Paris, "A model for solar spectral irradiance and radiance at the bottom and top of a cloudless atmosphere," *Journal of Climate and Applied Meteorology*, vol. 24, pp. 193-205, 1985.
155. C. Gueymard, *SMARTS2: A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and Performance Assessment*. Florida Solar Energy Center Cocoa, FL, 1995.
156. D. R. Myers, *Solar Radiation: Practical Modeling for Renewable Energy Applications*. CRC Press, 2013.

Anexos

Anexos

Este proyecto de tesis ha dado lugar a varios trabajos, los cuales se enumeran y recogen a continuación.

Publicaciones indexadas

- i. “Advanced daylighting evaluation applied to cultural heritage buildings and museums: Application to the cloister of Santa Maria El Pualar.”

Santiago Mayorga Pinilla, Daniel Vázquez Moliní, Antonio Álvarez Fernández-Balbuena, Gabriel Hernández Raboso, Juan Antonio Herráez, Marta Azcutia, Ángel García Botella.

Renewable Energy 2015; Volumen: 85 1-9 1362-1370.

Factor de impacto: 3.404, Q1: 2015.

- ii. “Spectral damage model for lighted museum paintings: Oil, acrylic and gouache.”

Santiago Mayorga Pinilla, Daniel Vázquez, Antonio Álvarez Fernández-Balbuena, Carmen Muro, Javier Muñoz.

Journal of Cultural Heritage 2016; Volumen 22 931–939.

Factor de impacto: 1.533, Q2. 2015

Contribuciones a congresos

Los resultados derivados de este trabajo han sido presentados en diferentes congresos científicos nacionales e internacionales.

NACIONALES

i. *X Congreso Nacional de Color 2013. Valencia.*

Se presenta un poster y una publicación "*Características de Iluminación natural y percepción color en el Claustro del Monasterio de El Paular*".

La edición del X Congreso Nacional del Color es un foro que permite poner en contacto a investigadores, estudiosos y profesionales de diversas disciplinas relacionadas con el mundo del color.

La temática propuesta para el congreso es multisectorial, con peculiaridades y connotaciones propias de las diferentes áreas de conocimiento que se integran en el Comité del Color de la Sociedad Española de Óptica.

ii. *Congreso Nacional de Estudio y Conservación del Patrimonio Cultural 2015. Málaga.*

Se realiza una presentación y una publicación "*Iluminación espectralmente selectiva aplicada al patrimonio cultural: Estudio realizado en el claustro de Santa María de El Paular*".

INTERNACIONALES

iii. LICHT 2016. Karlsruhe.



















Se realiza una publicación y una exposición "*Safe exhibition of artworks with natural light*" vinculada con el aprovechamiento de la *luz natural* en espacios iluminados con la misma

Se ha celebrado el 20º congreso del 25-28 de septiembre de 2016, simposio internacional que reúne asociaciones de Sociedades de Iluminación de Alemania (LiTG), Austria (LTG), Holanda (NSVV), Suiza (SLG) y Francia (AFE). "LICHT 2016" invita a los interesados en las tecnologías de la luz y la iluminación a intercambiar sus conocimientos y a desarrollar soluciones para los desafíos del futuro: El simposio está dirigido a profesionales y diseñadores de las áreas de tecnología, planificación y diseño, ciencia, industria y aplicaciones, arquitectura, diseño de interiores y arte, así como estudiantes de todos los campos de estudio relacionados con la iluminación.















Tablas anexas

Anexo A.1




Características de las *muestras* de pintura usadas en el proceso de envejecimiento del Capítulo 3.

		Leyenda	Transparente 	Semitransparente 	Semi-opaco 	Opaco 	
nº de Muestra	Tipo de pintura	Marca	Nombre	Serie	Características	Transparencia/opacidad	
1	ÓLEO	W&N Artists' Oil Colour	TITANIUM WHITE	644 Series 1 12 14 6 4 4	Permanence AA. Lightfastness I. Pigment: titanium dioxide, PW6. Zinc oxide, PW4. Vehicle: Sunflower oil		
2	ÓLEO	Talens Rembrandt	ZINC WHITE	104 +++			
3	ÓLEO	W&N Artists' Oil Colour	NAPLES YELLOW DEEP	425 Series 2 12 14 4 2 5	Permanence AA Pigment: Chromium titanium oxide PB24 Vehicle: Sunflower oil		
4	ÓLEO	Talens Rembrandt	CADMIUM YELLOW LIGHT	208 Series 5 +++	Pigment: PY 35		
5	ÓLEO	W&N Artists' Oil Colour	CADMIUM ORANGE	089 Series 4 12 14 0 8 9	Permanence A Lightfastness I Pigment: Cadmium sulphoselenide, PO20 y PR 108 Vehicle: Linseed/sunflower oils		
6	ÓLEO	W&N Artists' Oil Colour	PERMANENT CARMINE	479 Series 2 12 14 4 7 9	Permanence A Pigment: Quinacridone/pyrrol Vehicle: Linseed oil		
7	ÓLEO	W&N Artists' Oil Colour	CADMIUM RED	094 Series 4 12 14 0 9 4	Permanence A Lightfastness I Pigment: Cadmium sulphoselenide, PR 108. Vehicle: Linseed/sunflower oils		
8	ÓLEO	W&N Artists' Oil Colour	OXIDE OF CHROMIUM	459 Series 4 12 14 4 5 9	Permanence AA Lightfastness I Pigment: Chromium oxide, PG17 Vehicle: Linseed/sunflower oils		
9	ÓLEO	W&N Artists' Oil Colour	VIRIDIAN	692 Series 4 12 14 6 9 2	Permanence AA Lightfastness I Pigment: Hydrated chromium oxide, PG18 Vehicle: Linseed oil		
10	ÓLEO	W&N Artists' Oil Colour	SAP GREEN	599 Series 2 12 14 5 9 9	Permanence A Lightfastness I Pigment: Isoindolinone, PY 110. Copper phthalocyanine, PB 15 Vehicle: Linseed/sunflower oils		
11	ÓLEO	W&N Artists' Oil Colour	OLIVE GREEN	447 Series 2 12 14 4 4 7	Permanence A Lightfastness I Pigment: Isoindolinone, PY 110. Carbon black, PBk6 Vehicle: Linseed/sunflower oils		
12	ÓLEO	W&N Artists' Oil Colour	TERRE VERTE	637 Series 1 12 14 6 3 7	Permanence AA Lightfastness I Pigment: Natural earth, PG 23. Hydrated Chromium oxide, PG18		
13	ÓLEO	Talens Rembrandt	PRUSSIAN BLUE	508 Series 2 +++	Pigment : PB 27		
14	ÓLEO	Talens Rembrandt	ULTRAMARINE LIGHT	505 Series 2			

Capítulo 7. Anexos

15	ÓLEO	W&N Artists' Oil Colour	FRENCH ULTRAMARINE	263 Series 2 12 14 2 6 3	Permanence A Lightfastness I Pigment: Complex sodium aluminosilicate containing sulphur, PB29. Vehicle: Linseed/sunflower oils	
16	ÓLEO	W&N Artists' Oil Colour	CERULEAN BLUE	137 Series 4 12 14 13 7	Permanence AA Lightfastness I Pigment: Cobalt stannate, PB 35 Vehicle: Sunflower oil	
17	ÓLEO	Talens Rembrandt	COBALT BLUE LIGHT	513 Series 5 +++	Pigment: PB 28	
18	ÓLEO	W&N Artists' Oil Colour	PHTHALO TURQUOISE	526 Series 1 12 14 5 2 6	Permanence A Lightfastness I Pigment: Copper phthalocyanine, PG7. Chlorinated copper phthalocyanine, PB 15 Vehicle: Linseed oil	
19	ÓLEO	W&N Artists' Oil Colour	MANGANESE BLUE HUE	379 Series 1 12 14 3 7 9	Permanence A Lightfastness I Pigment: Copper phthalocyanine, PB 15. Chlorinated copper phthalocyanine, PG7 Vehicle: Sunflower oil	
20	ÓLEO	W&N Artists' Oil Colour	COBALT VIOLET	192 Series 5 12 14 19 2	Permanence AA Lightfastness I Pigment: Cobalt phosphate, PV 14 Vehicle: Sunflower oil	
21	ÓLEO	W&N Artists' Oil Colour	MAGENTA	380 Series 2 12 14 3 8 0	Permanence A Lightfastness I Pigment: Dioxazine violet, PV23, Quinacridone red, PR 122 Vehicle: Sunflower oil	
22	ÓLEO	W&N Artists' Oil Colour	RAW UMBER	554 Series 2 12 14 5 5 4	Permanence AA Lightfastness I Pigment: Natural iron oxide, PB7 Vehicle: Linseed/sunflower oils	
23	ÓLEO	W&N Artists' Oil Colour	RAW UMBER	552 Series 1	Permanence AA Lightfastness I Pigment: Natural iron oxide, PY42, Synthetic iron	
24	ACRÍLICO	Talens Rembrandt	TITANIUM WHITE	105 Series 1		
25	ACRÍLICO	Talens Rembrandt Talens Artist Quality Extra Fine	ZINC WHITE	104 Series 1 +++	Pigment PW4	
26	ACRÍLICO	Liquitex	CADMIUM RED LIGHT HUE	1045 51 Series 2	Munsell Hue 7,50R. Value 5,01. Chroma 13,4. Translucent Lightfastness I-Excellent M*** Vehicle: Acrylic Polymer Emulsion Pigment: Naphthol AS-OL (PR 9), Arylide Yellow 5 GX (PY 74 LF), Titanium Dioxide (PW 6) High Viscosity / Heavy Body	
27	ACRÍLICO	Liquitex Professional Acrylic Artist Color Heavy Body	CADMIUM ORANGE	1045 150 Series 4	Munsell Hue 3,06YR. Value 6,86. Chroma 14,99. Opaque Lightfastness I-Excellent M*** Vehicle: Acrylic Polymer Emulsion Pigment: Cadmium Orange (PO 20) High Viscosity / Heavy Body	
28	ACRÍLICO	Liquitex Professional Acrylic Artist Color Heavy Body	CADMIUM YELLOW MEDIUM	1045 161 Series 3	Munsell Hue 2,39Y. Value 8,27. Chroma 14,21. Opaque Lightfastness I-Excellent M*** Vehicle: Acrylic Polymer Emulsion Pigment: Cadmium Yellow (PY 35) High Viscosity / Heavy Body	
29	ACRÍLICO	Liquitex Professional Acrylic Artist Color Heavy Body	CHROMIUM OXIDE GREEN	1045 166 Series 2	Munsell Hue 9,49GY. Value 4,19. Chroma 4,25 Lightfastness I-Excellent M*** Vehicle: Acrylic Polymer Emulsion Pigment: Anhydrous Chromium Sesquioxide (PG 17) High Viscosity / Heavy Body	

Estudio y optimización espectral de la radiación visible para la
conservación del patrimonio cultural

30	ACRÍLICO	Liquitex Acrylique Artist Colour	BLUE CERULEUM	0220 164 Serie 4	Pigment: Cobalt and Chromium Oxides (PB 28) Value 3.9 Vehicle: Acrylic Polymer Emulsion	
31	ACRÍLICO	Talens. Rembrandt Talens Artist Quality Extra Fine	COBALT BLUE	511 Serie 3 +++	Pigment: PB28	
32	ACRÍLICO	Liquitex Professional	RAW SIENNA	1045 330 Serie 1	Munsell Hue 4,98 YR. Value 4,48. Chroma 5,44 Opaque	
33	GOUACHE	Maimeri Extrafine	TITANIUM WHITE	018 Serie T		
34	GOUACHE	Talens Extra fine quality	CARMINE	318 +	Pigment(S): PR112/ PR23	
35	GOUACHE	Talens Extra fine quality	ULTRAMARINE DEEP	506 +++	Pigment: PB29	
36	GOUACHE	Talens Extra fine quality	VIRIDIAN	616 +++	Pigment: PG7	
37	GOUACHE	Maimeri Extrafine	COBALT BLUE	375 **	Pigment (S): Sodium Polysulphide-Aluminosilicate PB29/ Phthalocyanine Beta PB 15:3	
38	GOUACHE	Maimeri Extrafine	RAW UMBER	493 **	Pigment (S): Carbon black PBk 7, Synthetic Iron Oxide PY 42, Synthetic Iron Oxide PR 101 PBk11	
39	GOUACHE	Maimeri Extrafine	RAW SIENNA	161 *	Pigment: Synthetic Iron Oxide PY 42, Diarylide Yellow PY 83	